



BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN
University of Applied Sciences

Beuth Hochschule für Technik Berlin

Fachbereich Bauingenieur- und Geoinformationswesen

Studiengang: Geoinformationen

Gebäudetypisierung basierend auf UltraCamX Daten für die Bestimmung der Attraktivitätsmerkmale der Wohnstandorte

Masterarbeit

Zur Erlangung des Grades eines

Master of Science (M.Sc.)

eingereicht von: **Lars Arnold**

Matrikel-Nr.: 809039

am: 15. 12. 2015

Erstgutachter: Dipl.-Ing. Anna-Maria Poznanska

Zweitgutachter: Prof. Dr. Matthias Möller

DLR-Betreuer: Dipl.- Geograph Benjamin Heldt

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Möglichkeiten einer automatisierten objektbasierten Klassifizierung urbaner Gebäude mithilfe von hochauflösenden Luftbilddaten der Kamera UltrCam X. Es wurde untersucht, inwieweit ohne flankierende Informationen aus anderen Datenquellen, eine valide Extraktion von Gebäuden, ihren Strukturen, einschließlich ihrer Höhen für deren Klassifizierung erfolgen kann. Hierfür wurden zwei Untersuchungsareale im Raum Berlin ausgewählt, die eine repräsentative Verteilung typischer Gebäude aufweisen. Die erzielten Ergebnisse beinhalten eine detaillierte Diskussion der Gebäudeflächen und -höhen. Die Gebäudehöhen wurde in Relation zu den Geschossanzahlen der Gebäude gebracht und eine Klassifikation in neun Gebäudeklassen variabler Höhe und Struktur vorgenommen. Essentiell für diese Typisierung war das Vorhandensein eines normierten digitalen Oberflächenmodells, aus dem sich die direkten Objekthöhen ableiten lassen. Die hohe Auflösung des zugrunde liegenden Luftbilddatenmaterials erlaubte es auch eingeschränkt einen Zugang zu Feinstrukturen, wie Balkonen zu erhalten. Die bei der Segmentierung und Klassifizierung auftretenden Probleme werden in der Arbeit ausführlich diskutiert und bewertet. Eine sich anschließende Genauigkeitsanalyse ergab sehr zufriedenstellende Ergebnisse, die ausweisen, dass die ermittelten gebäuderelevanten Größen valide bestimmt werden konnten. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass ebenso interessante Umfeldparameter der Gebäude ermittelt werden konnten, zu denen die erhöhte und bodennahe Vegetation, Dachbegrünung, Balkonstrukturen und Wasseranbindung gehören. Im zweiten Teil der Arbeit wurden diese Resultate auf ihren Einsatz zur Attraktivitätsanalyse von städtischen Wohnstandorten hin untersucht. Da für diesen Teil ebenfalls keine Referenzdaten zur Verfügung standen und auch nicht genutzt werden sollten, wurden in einer umfassenden Literaturanalyse allgemeine Relationen messbarer Gebäudegrößen und ihres Umfeldes sorgfältig untersucht und zu verwendbaren Merkmalen verdichtet. Zu ihnen gehören unter anderem Relationen des Bebauungsanteils, des Bebauungsvolumens, der Homogenität der Raumoberkante u.a. In diesem Bereich gibt es nicht viele Basisarbeiten, auf die sich diese Arbeit beziehen konnte. Die automatisierte, ausschließlich auf Luftbilddaten beruhende, objektbasierte Gebäudeklassifizierung, die Attraktivitätsmerkmale von Wohnstandorten extrahiert, ist ein innovatives Forschungs- und Einsatzfeld. Vor besonderem Wert ist deshalb, dass es in der Arbeit gelungen ist, generelle Zusammenhänge zwischen den Größen der Gebäudeextraktion und der ihres Umfeldes zu ermitteln und zu überprüfen. Bebauungsanteile und Parameter wie Volumen, Fläche, mittlere Höhe konnten in einem der Untersuchungsgebiete in ihrer räumlichen Variation analysiert werden. Hierfür wurde das Gebiet auf seine Teilverkehrszellen heruntergerochen und die Feinstruktur der Varianz dieser Größen analysiert. Unter gleichzeitiger Verwendung der Umfeldparameter Vegetation und Wasser wurden sichtbare Variationen der Attraktivität extrahiert und analysiert. Auch diese Ergebnisse wurden einer kritischen Diskussion unterzogen. Der hier verfolgte Ansatz ist vielversprechend für die avisierten Anwendungen zur Attraktivitätsanalyse bei der Bewertung urbaner Wohnstandorte und intermodaler Verkehrskonzepte. Ein Ausblick zeigt, dass die Einbeziehung weiterer Analysegrößen noch weitere Potentiale auf diesem Weg zu erschließen kann. Der Mehrwert der Methode besteht in der zeitnahen großflächigen Erhebung der Daten bei gleichzeitig hoher räumlicher Auflösung und deren automatisierter Bearbeitung für die

Bereitstellung der gewünschten Informationen. Überall dort, wo diese Aspekte im Vordergrund stehen, liefert der verfolgte Ansatz eine hoch valide Grundlage für die urbane Analyse von Wohnstandorten, ihrer Attraktivität und ihrer verkehrlichen Anbindung.

Abstract

This thesis examines the possibilities of an automatized object-based image analysis (OBIA) to classify urban buildings by means of high resolution areal images taken by the UltraCam X system. It was analyzed whether without any flanking data from other sources valid building properties and structures including their heights can be extracted by these studies. For this purpose two target areas in Berlin were chosen, representing a high and typical variability of urban buildings. The discussion of the extracted results includes a detailed analysis of building areas and building heights. The building heights were related to the number of building floors and a classification of nine building classes of different heights was performed. One essential step for this process was the availability of a normalized digital surface model (nDSM). On the basis of this model it is possible to derive information about the object's height. The high resolution of the areal data enabled to retrieve finer geometric structures, like balconies in a limited way. Special problems that occurred during in the framework of segmentation and classification are discussed and assessed in detail. An accuracy assessment reveals in very satisfactory results indicating the valuable extraction of geometric building parameters. Furthermore, it has been shown that important neighboring characteristics like vegetation and close distances to water bodies could be extracted. They include elevated, ground and roof greening provinces. In the second part of this thesis an analysis of these parameters in respect to their evaluability for an attractiveness assessment have been investigated. In this case too, no reference data of residential location attractiveness were available and neither should be used for the analysis. Applicable attributes of attractiveness were derived only basing on an extensive literature research of generic relationships between measurable building properties and properties of their close environment. They include relations between building densities (amount of building development), volume of building development, homogeneity of top level building height structure and others. Within this research area there are not many publications to refer on. Therefore, the automated object-based image analysis of areal images only to extract features of building attractiveness of urban residential locations is an innovative field of research and application. Thus, a particular value of this work is a successful review of general interrelations of the extracted building properties and of their close environment against the background of attractiveness parameters. Properties like building densities, volume and area of buildings, mean building heights within building cells have been investigated in one of the study areas in respect of their spatial variations. For this purpose the study area was divided into sub units of traffic cells enabling to analyze the fine structure of occurring variations of the extracted properties. By simultaneous use of derived environmental features (vegetation, water) the character of attractiveness features and variations of them have been extracted and analyzed. These results were subjected to a critical review as well. This approach is promising for the notified implementation of the urban building's attractiveness analysis, for the assessment of the attractiveness of urban residential locations, and for intermodal urban traffic concepts. The outlook of resulting future prospects shows that with inclusion of additional analysis variables further potentials for attractiveness studies can be opened. The value added by this method consists of both, the possibility of a contemporary large area data acquisition at high spatial resolution and the automated supply of the information required. Wherever these issues are the primary driver of application, this approach permits a highly

valid basis for the analyses of urban residential locations, their attractiveness and their transport links.

Danksagung

Ich möchte Frau Dipl. Ing. Anna-Maria Poznanska und Herrn Dipl. Geograph Benjamin Heldt für die Definition der Aufgabenstellung und die vielen hilfreichen Diskussionen zum Thema dieser Arbeit danken. Mein Dank gilt auch der Beuth-Hochschule für Technik, Berlin für den Zugang zur Software eCognition und dem Institut für Verkehrsforschung des DLR, Berlin für die interessanten Einblicke in die Forschungsinhalte intermodaler Mobilität in urbanen Räumen. Ein besonderer Dank gilt auch meiner Familie, die mich in der Zeit der Erstellung der Arbeit unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	II
Abstract	IV
Danksagung	VI
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Gliederung der Arbeit	2
2 Stand der Wissenschaft	4
2.1 Gebäudebezogene Attraktivität des Wohnstandortes	4
2.2 Gebäudebezogene Klassifikation der urbanen Morphologie	9
2.3 Offene Fragen für die fernerkundliche Attraktivitätsanalyse von Gebäuden	12
3 Datengrundlage	14
3.1 Begründung der Datenauswahl	14
3.2 Das Kamerasystem der UltraCam X	19
3.3 Befliegung 2010 und Bildprodukte	20
3.4 Photogrammetrische Prozessierung des digitalen Oberflächenmodells (DOM) und des True Orthophotos (TOM)	21
3.5 Ableitung zusätzlicher Datenprodukte und Eigenschaften der Daten	24
3.6 Verwendete Vektordaten	29
3.7 Kriterien zur Auswahl der Untersuchungsgebiete und deren Charakteristika	29
4 Methoden der Bildanalyse	36
4.1 Segmentierung	36
4.1.1 Pixelorientierte Verfahren	38
4.1.2 Kantenorientierte Verfahren	38
4.1.3 Regionenorientierte Verfahren	38
4.1.4 Modellbasierte Verfahren	39
4.1.5 Texturorientierte Verfahren	41
4.1.6 Segmentierung in eCognition	41
4.2 Objektdatenbank	45
4.3 Wissensrepräsentation	46
4.4 Merkmalsgewinnung und Klassifikation	47
5 Umsetzung der Objektextraktion	49
5.1 Gebäudeklassen	49
5.2 Workflow	58
5.3 Segmentierungsprozesse	59
5.3.1 Kontrast Filter Segmentierung	60
5.3.2 Multiskalare Segmentierung	61
5.4 Klassifizierungsprozesse	64

6	Genauigkeitsanalyse der objektbasierten Klassifizierung	77
6.1	Strategien der Genauigkeitsanalyse und der Wahl der Referenzdaten	77
6.2	Ermittlung der Stichprobenanzahl für die Genauigkeitsanalyse der objektbasierten Klassifizierungsergebnisse	81
6.3	Durchführung und Ergebnisdiskussion der Genauigkeitsuntersuchung auf Grundlage des Luftbilddatensatzes	83
6.4	Vergleich der Klassifikationsergebnisse mit den Gebäudegrundrissen des amtlichen Liegenschaftskatasters	85
6.5	Bewertung der Übereinstimmung der Ergebnisse im Vergleich zu amtlichen Liegenschaftsdaten	100
7	Attraktivitätsanalyse der Wohnstandorte	102
7.1	Vorgehen zur Attraktivitätsanalyse im Untersuchungsgebiet	102
7.2	Gebäude und Gebäudestrukturen	106
7.3	Gebäude in ihrem Umfeld	111
7.4	Relevante Korrelationen für die Attraktivitätsanalyse	112
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	120
	Literaturverzeichnis	XII
	Quellenverzeichnis	XIX
	Anhänge	XXII
	Anhang 6.A zu Kapitel 6	XXII
	Anhang 7.A zu Kapitel 7	XXVII
	Anhang 7.B Regelkette	XXX
	Anhang 7.C Karten	XXXIII

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Visualisierung von Erregungspotential, Aversion und hedonistischem Wert.	7
Abb. 3.1 <i>UltraCam X</i> : Links: Kamerakopf. Rechts: Aufnahmemuster der Kamera aus GRUBER (2007: 666) sowie LEBERL et al. (2012).	19
Abb. 3.2 Beispiel einer Verkippung in der zentralperspektivischen Projektion einer Flächenkamera (rechts) und der orthographischen Projektion (links). Entnommen aus Wikipedia (2015a, Orthophoto).....	22
Abb. 3.3 Orthophoto vs. True Orthophoto.	23
Abb. 3.4 Restfehler bei der Mosaikbildung, adaptiert nach WIEDEMANN (2015: 5).	24
Abb. 3.5 Links das Gebäude in der RGB-Ansicht, rechts das höhenverfälschte nDOM.....	24
Abb. 3.6 Links, schematische Darstellung der Berechnung des nDOM. Rechts oben, DOM mit rot markiertem Teufelsberg. Rechts unten, berechnetes nDOM mit rot markiertem Teufelsberg (POZNANSKA & BAYER, 2014: 14).....	26
Abb. 3.7 Links oben, Gebäudestruktur mit dicht angrenzendem Baum im nDOM. Rechts oben, Count Maske derselben Szene. Unten, dreidimensionales Höhenprofil des nDOM.....	27
Abb. 3.8 Von links nach rechts: A, Hochhaus mit starken Verschattungen. B, nDOM mit Fehlern in Schattenbereichen. C, Count Maske, je heller desto mehr korrespondierende Punkte sind gespeichert. D, nIR für vegetative Analysen.	27
Abb. 3.9 Neigungs-Layer.	28
Abb. 3.10 Ergebnisse der OBIA und Flächennutzung aus dem Umweltatlas (gelbe Umrandung), links und das dazugehörige Luftbild rechts, (Quelle: Google Earth).	31
Abb. 3.11 Auszug aus den Attributdaten des Umweltatlas für den Flächen- und Strukturtyp aus Abb. 3.1.....	31
Abb. 3.12 Verteilung der Flächennutzung der jeweiligen Untersuchungsgebiete (Quelle: Umweltatlas).....	33
Abb. 3.13 Darstellung der Untersuchungsgebiete.....	35
Abb. 4.1 Zusammenhang zwischen Bildraum und Parameterraum bei der Hough-Transformation (BURGER & BURGE, 2005: 159).	40
Abb. 4.2 Beispiel für Kontrast Filter Segmentierung: links RGB, rechts nDOM (ARNOLD, 2013: 32).....	42
Abb. 4.3 Hierarchisches Netzwerk von Bildobjekten auf zwei Ebenen. Bildpunkte in Ebene 2 werden zu Bildobjekten in Ebene 1 zusammengefasst (adaptiert nach ANDRESEN, 2004: 49).....	45
Abb. 4.4 Stabile und instabile Eigenschaften in der eCognition Objektdatenbank (ANDRESEN, 2004: 51).	46
Abb. 5.1 Veranschaulichung der Definition von Lichter Höhe und Geschosshöhe nach IRAP (2006: 5).....	50
Abb. 5.2 Gebäudeklassen (GK) nach der Einteilung der Bauordnung für Berlin (SENSTADT, 2007: 5).	51
Abb. 5.3 Definition der Gebäudeklassen.	54

Abb. 5.4 Beispiele von typischen Gebäuden der in Tab. 5.1 und Abb. 5.3 definierten Klassen aus dem Untersuchungsgebiet I (Quelle: Google Earth).....	55
Abb. 5.5 Workflow der Segmentierung zur Klassifizierung.	58
Abb. 5.6 Kontrast Filter Segmentierung: links nDOM, rechts RGB.	61
Abb. 5.7 Segmentierungsparameter für die Multiskalare Segmentierung in eCognition (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 70).....	62
Abb. 5.8 Segmentierungsergebnis der multiskalaren Segmentierung im Untersuchungsgebiet I.	63
Abb. 5.9 Klassifizierungsablauf anhand eines Hochhauskomplexes.....	67
Abb. 5.10 Balkonextraktion, links Segmentierung, rechts Klassifizierung.	68
Abb. 5.11 Klassifikationsergebnis der Gebäude mittlerer Höhe ohne Zusammenführung der Segmente vor der Neigungsabfrage.	70
Abb. 5.12 Funktionsschema der Längenberechnung von kurvigen Objekten mittels Skeletons. (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 367).....	73
Abb. 5.13 Fehlklassifizierung von Einfamilienwohnhäusern.	74
Abb. 5.14 Fehlerhafte Erfassung eines Brücken- und Straßenelementes.	75
Abb. 5.15 Multiple Klassifizierung eines Gebäudekomplexes.	75
Abb. 6.1 Schematische Darstellung einer Konfusionsmatrix (Quelle: CONGALTON & GREEN, 1999: 47).....	79
Abb. 6.2 Zentrale Wahrscheinlichkeit der Standardnormalverteilung (MOSSIG, 2012: 17).	82
Abb. 6.3 Beispiel für die Attribuierung eines Gebäude in der ALK (vgl. Abb. 6.5, links).....	86
Abb. 6.4 Hochhaus aus Abb. 6.3 (Quelle: Google Earth).	86
Abb. 6.5 Attribuierung des Rechts gezeigten baugleichen Gebäudes in der ALK (vgl. 6.3 und 6.4).....	86
Abb. 6.6 (links): Referenzbild im Untersuchungsgebiet als TOM und darüber liegender ALK Gebäude-Layer mit den ALK-Grundrissen in gelber Umrandung zur Visualisierung der Problematik von Dachüberständen.	88
Abb. 6.7 (rechts): Klassifikationsergebnis für Gebäude mit Schrägdach (Rot, transparent). ...	88
Abb. 6.8 Beispiel von Gebäudegrundrissen aus ALK-Daten (Gelb), die bündig mit dem Dach abschließen und als Referenz geeigneter sind als im Fall der Abb. 6.6.....	89
Abb. 6.9 Links: Klassifikationsergebnis im Untersuchungsgebiet I: Beispiel eines Gebäudekomplexes mit einer Überklassifizierung (links, roter Kreis) und Unterklassifizierung (rechts); Gelb: ALK-Gebäudegrundrisse.	89
Abb. 6.10 Graphische Darstellung der Klassifikationsergebnisse mit der Grundrissfläche der ALK.	91
Abb. 6.11 Beispiel für Dachstruktur verdeckende Objekte (hier Bäume), sowie Schattenflächen, Fehler im Oberflächenmodell und Klassifizierungseinstellungen, die Extraktionsfehler hervorrufen.	92
Abb. 6.12 Graphische Darstellung der Ergebnisse der Verschneidung der aus der OBIA gewonnen Gebäudeklassen und den Grundrissflächen der ALK.....	93

Abb. 6.13 Prozentuale Unterklassifizierung der aus der OBIA gewonnen Gebäudeklassen und den Grundrissflächen der ALK.	93
Abb. 6.14 Fehlklassifizierung vom Bäumen als Einfamilienwohnhäuser (Violett).....	95
Abb. 6.15 Beispiel einer Überklassifizierung (links, siehe rot-orange eingefärbte Fläche), hervorgerufen durch Fehler im Oberflächenmodell (rechts). Der Gebäudegrundriss der ALK ist zum Vergleich in Gelb dargestellt.	95
Abb. 6.16 Brückenobjekt (blau), welches im Oberflächenmodell erfasst wird und dadurch in der OBIA als Gebäude extrahiert wird.....	95
Abb. 6.17 Graphische Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit den aus der ALK bereinigten Ergebnissen.	96
Abb. 6.18 Überklassifizierung des Klassifikationsergebnisses im Vergleich zu den aus der ALK bereinigten Ergebnissen.	96
Abb. 6.19 Verteilung der durch die OBIA extrahierten Flächen. Balkon und Wasserflächen sind in dieser Darstellung wegen ihrer prozentualen Geringfügigkeit nicht ausgewiesen.....	98
Abb. 6.20 Prozentuale Genauigkeit der Übereinstimmung des bereinigten Klassifizierungsergebnisses mit ALK-Daten.	100
Abb. 7.1 True Ortho Mosaik, RGB-Darstellung für das Untersuchungsgebiet I.....	102
Abb. 7.2 nDOM für das Untersuchungsgebiet I.....	103
Abb. 7.3 Struktur der Teilverkehrszellen im Untersuchungsgebiet I.....	104
Abb. 7.4 Ergebnis der Gebäudeklassifikation im Untersuchungsgebiet I in den Teilverkehrszellen.	104
Abb. 7.5 Ergebnis der Umfeldklassifikation im Untersuchungsgebiet I in den Teilverkehrszellen.	105
Abb. 7.6 Prozentualer Bebauungsanteil in Untersuchungsgebiet I je TVz (Choroplethenkarte).	106
Abb. 7.7 Prozentualer Anteil der Gebäudeklassen der Hochhäuser im Untersuchungsgebiet I.	107
Abb. 7.8 Prozentualer Anteil der Gebäudeklassen der Gebäude mittlerer Höhe im Untersuchungsgebiet I.....	108
Abb. 7.9 Prozentualer Anteil der Gebäudeklassen der Gebäude niedriger Höhe im Untersuchungsgebiet I.....	109
Abb. 7.10 Prozentualer Anteil der Gebäudeklassen mit speziellem Nutzen im Untersuchungsgebiet I.....	110
Abb. 7.11 Prozentualer Anteil der Vegetation im Untersuchungsgebiet I (ohne spezielle Berücksichtigung von Sachbegrünung, obere Grünfärbung: bodennahe Vegetation, unten: erhöhte Vegetation).....	112
Abb. 7.12 Abhängigkeit des Bebauungsanteils von der mittlern Gebäudehöhe in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.	113
Abb. 7.13 Abhängigkeit des Bebauungsanteils vom mittleren Bebauungsvolumen in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.	113

Abb. 7.14 Abhängigkeit des Bebauungsvolumens von der mittlern Gebäudehöhe in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.	114
Abb. 7.15 Korrelation zwischen dem Bebauungsanteil und Vegetationsfläche (erhöht + bodennah) in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.	115
Abb. 7.16 Korrelation zwischen dem Bebauungsanteil und der Dachbegrünung in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.	116
Abb. 7.17 Anteilmäßige Verteilung der Gebäudeklassen in TVz 9 und dortiges Stadtbild.	117
Abb. 7.18 Anteilmäßige Verteilung der Gebäudeklassen in TVz 34 und dortiges Stadtbild.	117
Abb. 7.19 Anteilmäßige Verteilung der Gebäudeklassen in TVz 26 und dortiges Stadtbild.	118
Abb. 7.20 Anteilmäßige Verteilung der Gebäudeklassen in TVz 26 und dortiges Stadtbild.	118

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 Korrelation von einigen messbaren Gebäudeattributen und Attraktivitätsmerkmalen.	11
Tab. 2.2 Korrelation von einigen messbaren Attributen des Gebäudeumfeldes und Attraktivitätsmerkmalen.....	12
Tab. 3.1 Zusammenfassung der Befliegungsdaten für das Innenstadtgebiet von Berlin 2010 (POZNANSKA & BAYER, 2014: 7).....	21
Tab. 5.1 Definition der Gebäudeklassen.....	53
Tab. 6.1 Schematische Darstellung einer Konfusionsmatrix adaptiert nach CONGALTON & GREEN (1999: 46) und die Berechnung einiger beispielhafter Genauigkeitsmaße.....	80
Tab. 6.2 Anzahl der Samples für die pixelbasierte Genauigkeitsuntersuchung der klassifizierten Ergebnisse mit den Referenzdaten der UltraCam X.	83
Tab. 6.3 Resultate der Genauigkeitsuntersuchung der aus der OBIA klassifizierten Ergebnisse im Vergleich zum Luftbilddatensatz aus dem Untersuchungsgebiet I in Form einer Konfusionsmatrix.....	84
Tab. 6.4 Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit der Grundrissfläche der ALK. ...	90
Tab. 6.5 Gegenüberstellung der ALK-bereinigten Klassifikationsergebnisse mit der ALK-Grundrissfläche.....	91
Tab. 6.6 Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit den bereinigten Ergebnissen aus dem ALK-Datensatz.....	94
Tab. 6.7 Extrahierte Flächen der OBIA des Untersuchungsgebietes I in m ² an.	97
Tab. 6.8 Gegenüberstellung der Gebäudeanzahl der OBIA mit denen in der ALK verzeichneten Gebäuden.	98
Tab. 6.9 Gegenüberstellung der Gebäudeanzahl des bereinigten OBIA-Ergebnisses aus der ALK und dem ALK-Datensatz selbst.	99

Abkürzungsverzeichnis

ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
ArcGIS	GIS-Software des Unternehmens ESRI
ARGEBAU	Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der 16 Bundesländer
ATKIS	Amtlich Topographisch-Kartographisches Informationssystem
AT	Aerotriangulation
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumentwicklung
BauO Bln	Bauordnung Berlin
DGM	Digitales Geländemodell
dInSAR	Differenzielles InSAR
DOM	Digitales Oberflächenmodell
eCognition	Software für die objektbasierte Bildanalyse/Segmentierung von Trimble
ERDAS	Earth Resource Data Analysis System
ETR89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
ESRI	Environmental Research Institute, USA
GIS	Geoinformationssystem
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance (Bodenauflösung)
INS	Internal Navigation System
InSAR	Interferometrisches SAR
IRAP	Institut für Raumentwicklung, HS Rapperswil
LiDAR	Light Detection and Ranging
LOR	Lebensweltlich Orientierter Raum
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit
nDOM	Normiertes digitales Oberflächenmodell
nIR	Nahes Infrarot
NDVI	Normalized Differenced Vegetation Index (Vegetationsindex)
OBIA	Objektbasierte Bildanalyse (object-based image analysis)
OSM	OpenStreetMap
RAR	Real Aperture Radar
RGB	Rot, Grün, Blau (Farbraum)
SAR	Synthetic Aperture Radar
Senstadum	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin
SGM	Semi Global Matching
SLR	Side Looking Radar
SQL	Structured Query Language (Datenbanksprache)
StG	Statistische Gebiete
TOM	True Ortho Mosaic

TVz	Teilverkehrszelle
UCX	UltraCam X
UTM	Universal Transverse Mercator (Koordinatensystem)
VIS	Visueller Spektralbereich

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Städte bilden den Lebensmittelpunkt großer Bevölkerungsgruppen. In der Stadt verbindet sich städtisches Wohnen mit Bildung, Arbeit, Kommunikation und Freizeit. Die Lebensqualität der Städter ist ein wichtiger Faktor, der das soziale, ökonomische und politische Gleichgewicht in urbanen Räumen maßgeblich beeinflusst. Die Lebensqualität der Bürger in urbanen Wohnstandorten hängt von zahlreichen Faktoren ab, zu denen die Wohn- und Arbeitssituation, die Qualität der Wohnstandortumgebung, die soziale, kulturelle und verkehrliche Anbindung, das Freizeitangebot sowie zahlreiche weitere gehören. Die Gestaltung der bestehenden und der schnell wachsenden, neuen urbanen Strukturen stellt eine große Herausforderung für die Optimierung der Qualität von Wohn- und Lebensstandorten für die Stadtbewohner dar. Wichtige Elemente für bewertende und planerische Aufgaben sind Analysen des Wohnstandortes nach Kriterien wie denen der Situation von Einzelhaushalten im Wohnstandort, der Eigenschaften des Wohnstandortes selbst, den Charakteristika der Wohnortumgebung und der Erreichbarkeit des Arbeitsplatzes und Zugänglichkeit zu sozialen, kulturellen und anderen urbanen Orten und Einrichtungen, die Mobilitätskonzepte einschließen. Attribute aus diesen Analysen fließen in aktuelle Wohnstandortmodelle ein, die es erlauben, eine Optimierung der Prozesse zu untersuchen. Diese Zusammenhänge werden z.B. im Teilprojekt der Arbeitsgruppe Modellierung urbaner Mobilität, Abt. Mobilität und Urbane Entwicklung am Institut für Verkehrsforschung des DLR analysiert. Im Mittelpunkt stehen dabei Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen intermodalem Mobilitätsverhalten, Mobilitätskonzepten und dem Wohnstandort. Die Struktur des städtischen Raumes ist entscheidend für die urbane Mobilität. Intermodale Mobilität hängt deshalb von den Merkmalen städtischer Räume ab. Der Charakter von Wohnstandorten bestimmt gleichzeitig den Mietspiegel und die Mietpreisentwicklung. Allein im Berliner Raum mit einer Fläche von 89.168 ha, 3.52 Mio. Einwohnern beläuft sich der Wohnungsbestand auf ca. 1.9 Mio. (BBU, 2015; IBB, 2015). Die Attraktivität dieser Immobilien und deren Umfeld sind wichtige Faktoren für die Wahl des Wohnstandortes und somit ein steuerndes Element in der urbanen Dynamik. Die Attraktivitätsattribuierung und -analyse ist deshalb eine wichtige Methode für die Bewertung der Qualität urbaner Strukturen und der intermodalen Mobilität der Stadtbewohner.

1.2 Zielsetzung

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Ermittlung von Eigenschaften urbaner Wohngebäude, des unmittelbaren Umfeldes (Nahfeld) der Wohngebäude sowie auf der Attraktivitätsattribuierung beider. Möglichkeiten zur automatisierten und flächigen Bewertung werden untersucht. Im Mittelpunkt steht deshalb Erprobung der automatisierten Erfassung, Extraktion und Attribuierung von Gebäudestrukturen im urbanen Raum am Beispiel von Testareale in Ost- und West-Berlin. Hierfür werden hochauflösende digitale Fernerkundungsdaten der UltraCam X (UCX) eingesetzt. Methoden der objektbasierten Klassifizierung werden in Kombination mit GIS- gestützten Standortanalysen angewandt. Auf die Verwendungen von Geobasisdaten und Liegenschaftsdaten wurde bewusst verzichtet, um die Kapazitäten fernerkundlicher Klassifizierungsmöglichkeiten zu testen. Diese Vektordaten werden ausschließlich zur Validierung der Ergebnisse und Verifizierung der Gebäudestrukturen verwendet. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer automatisierten Regelkette zur Extraktion der beschriebenen Eigenschaften, die eine höchstmöglich erzielbare Genauigkeit der Erfassung erreicht und Rückschlüsse über Attraktivitätsmerkmale von

Wohngebäuden in urbanen Wohnstandorten liefert. In der Literatur beschriebene Eigenschaften wie die mittlere Gebäudehöhe, Dachform, Bebauungsanteile sowie die Gebäudegestaltung (z.B. Balkone oder Dachbegrünung) u.a. andere werden dabei auf die Validität einer Grundlage für die Ableitung von Attraktivitätsmerkmalen für die Wohnstandortwahl eruiert. Eine objektbasierte Bildanalyse (OBIA) wurde zur Extraktion räumlicher und thematischer Eigenschaften von Gebäuden und ihres Umfeldes eingesetzt. Dieses Vorgehen erforderte einen wissensbasierten Ansatz. Kriterien der Reproduzierbarkeit und Anwendbarkeit auf andere urbane Strukturen wurden berücksichtigt, um ein möglichst aussagekräftiges und breit gefächertes Model der Gebäudetypisierung zur Merkmalsbestimmung der Attraktivität der Wohnstandortwahl in deutschen städtischen Gebieten zu entwickeln. Schließlich werden die resultierenden Vor- und Nachteile der Methode untersucht und Aspekte ihres Mehrwertes gegenüber traditionellen (vektoriellen) diskutiert.

1.3 Gliederung der Arbeit

Das Kapitel zwei der Arbeit beschäftigt sich mit der ausführlichen Diskussion des Standes der Forschung zur Attraktivität von Immobilien und ihrem Umfeld. Dabei werden Ergebnisse unterschiedlicher Forschungsdisziplinen integriert. Sie umfassen psychologische Gesichtspunkte der Bewertung von Gebäudeattraktivität, der Umfeld-Attraktivität und - Wahrnehmung ebenso wie die Diskussion messbarer Größen zur Attraktivitätsattribution. Frühere Ergebnisse des Einsatzes von Fernerkundungsdaten zur Bearbeitung dieser Fragestellung werden behandelt. Aus den wenigen in der Literatur verfügbaren Daten zur ausschließlichen Attraktivitätsattribution aus Fernerkundungsdaten von Gebäuden und den traditionellen Ansätzen zur Attraktivitätsbewertung werden messbare Größen definiert, die in der späteren Attraktivitätsanalyse zum Einsatz kommen. Das war insbesondere deshalb erforderlich, da keine verfügbaren Daten zur Attraktivitätsbewertung der Untersuchungsgebiete in Form von Abfrageergebnissen neutraler Testpersonen oder anderer belastbarer statistischer Grundlagen zur Attraktivitätsbewertung vorlagen. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung des Innovationspotentials auf das die vorliegende Arbeit zielt.

Das dritte Kapitel diskutiert und begründet die Datengrundlage. Die verwendeten Messungen der Luftbildkamera UCX werden detailliert beschrieben und mit anderen fernerkundlichen Verfahren verglichen. Vor- und Nachteile der eingesetzten Methode im Vergleich zu diesen alternativen Methoden werden diskutiert. Das Kapitel drei fasst deshalb ebenso den Stand der Wissenschaft und den Vergleich des Einsatzes verschiedener Methoden der Fernerkundung für eine Gebäudeextraktion zusammen. Für den Leser werden zudem die Begriffe der passiven Fernerkundung wie die räumliche Auflösung u.a. eingeführt.

Das vierte Kapitel behandelt die Methoden der Bildanalyse. Es werden die Prozesse der Bild-Segmentierung, darunter pixelorientierte, kantenorientierte, regionalorientierte, modellbasierte und texturorientierte Verfahren thematisiert. Besonderheiten der für die Segmentierung eingesetzten Software (eCognition), dessen Objektdatenbank, seiner Wissenspräsentation, der Merkmalsgewinnung und Klassifikation werden gesondert diskutiert. Das Kapitel legt die Grundlagen für die Anwendungen, die in Kapitel fünf beschrieben werden.

Das Kapitel fünf fasst die notwendigen Gesichtspunkte der Umsetzung der objektbasierten Klassifizierung zusammen. Hierzu gehören die Definition der Gebäudeklassen, der Workflow der Gebäudeextraktion, sowie der Segmentierungs- und Klassifizierungsprozess.

Im Kapitel sechs sind die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse beschrieben und diskutiert. Es enthält sowohl die Strategien der Genauigkeitsanalyse als auch die Ermittlung der Stichprobenanzahl der klassifizierten Ergebnisse und deren Durchführung und Bewertung. Weiterhin findet ein Vergleich der Ergebnisse anhand des amtlichen Liegenschaftskatasters statt.

Das Kapitel sieben beschäftigt sich mit der Attraktivitätsanalyse der Wohnstandorte. Dabei wird zuerst das Vorgehen zur Attraktivitätsanalyse erklärt und im weiteren Verlauf die Attraktivitätsmerkmale des ausgewählten Untersuchungsgebietes anhand der Gebäude und seiner Umfeldparameter analysiert und bewertet.

Eine Zusammenfassung und Diskussion der Resultate schließt mit Kapitel acht die Arbeit ab.

Ein ausführlicher Anhang und die digitale Form aller Daten und Datenbanken, erlauben es dem Leser gesonderte Aspekte seines Interesses zu vertiefen.

2 Stand der Wissenschaft

Die Attraktivität von urbanen Wohnstandorten kann nur in komplexen Synergien von historisch bedingten, sozialpolitischen, demografischen, wirtschaftlichen und standortbezogenen Faktoren betrachtet werden. Innerhalb dieses Spektrums richtet sich die Arbeit ausschließlich auf die Bewertung messbarer Strukturen von Gebäuden und Gebäude-Ensembles und ihres unmittelbaren Umfelds, die die Qualität eines Wohnstandortes charakterisieren können.

In den folgenden Abschnitten des Kapitels werden Forschungsschwerpunkte und Aspekte der Attraktivität von Gebäuden und ihres Wohnumfeldes in urbanen Räumen und die resultierenden Gesichtspunkte für messbare Erhebungen zusammengefasst. Außerdem findet eine Einordnung der eigenen Arbeiten in diesen Kontext statt. Der Stand der Wissenschaft fernerkundlicher Verfahren zu deren Untersuchung wird im Kapitel 3 diskutiert.

2.1 Gebäudebezogene Attraktivität des Wohnstandortes

Die subjektive Lebensqualität von Menschen wird von den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften sowie der Psychologie untersucht. Die psychologischen Begriffe, die sie charakterisieren, sind das Wohlbefinden, das Glück, die Zufriedenheit und die Lebensqualität selbst, die in der wissenschaftlichen Psychologie operationalisiert werden. Sie hängen gleichsam von der Persönlichkeit, den Lebenseinstellungen sowie den objektiven Lebensbedingungen des Individuums ab (MADERTHANER, 1998). Während Glück und Wohlbefinden primär mit der Persönlichkeit und den Einstellungen der Menschen assoziiert sind, wird die Lebensqualität mit der Umwelt und den Lebensbedingungen verknüpft. Dabei ist der Begriff Lebensqualität äußerst vielschichtig. MADERTHANER (1998) schlägt deshalb vor, die Begriffe Lebensbedingungen und Lebenszufriedenheit zu verwenden, um physische und psychische Faktoren zu unterscheiden. Die Lebensbedingungen werden von externen Einflussgrößen bestimmt, während Bedürfnisse, Einstellungen, Erfahrungen, Verhalten u.a. die internen Einflussgrößen charakterisieren (MADERTHANER, 1998). In diesem Sinne lassen sich die Lebensbedingungen durch physisch „messbare“ Eingangsparameter untersuchen. Sie lassen sich aus den lebensraumbezogenen Bedürfnissen ableiten, die auf die Gestaltung des sozialen, gebauten, technischen und natürlichen Lebensraums des Menschen zielen (MADERTHANER, 1998). MADERTHANER (1998), MASLOW (1954), KUBINGER et al. (1986), FLADE (1987), TOGNOLI (1987), ROHRMANN (1988) zählen hierzu die Regeneration, Privatheit, Sicherheit, Funktionalität, Ordnung, Kommunikation, Aneignung, Partizipation und Ästhetik.

In der vorliegenden Arbeit soll ein engerer Raum der allgemeinen Lebensbedingungen näher untersucht werden, der die Wohnqualität im urbanen Bereich anhand der Attraktivität von Gebäuden und Gebäudekomplexen am Beispiel zweier Untersuchungsgebiete in Berlin aus Luftbilddaten beleuchtet. Hierbei geht es primär um die Attraktivität der Gebäude und ggf. sekundär auch um einige Faktoren des unmittelbaren Gebäudeumfeldes, die sich aus den beschriebenen lebensraumbezogenen Bedürfnissen ableiten.

Die Attraktivitätsanalyse von Gebäuden im urbanen Bereich lässt sich nicht nur an geometrischen Faktoren, wie deren Größe, Umfang, Höhe, Standort oder anderen Kriterien festmachen, sondern sie definiert sich auch an der Wahrnehmung des Einzelobjektes, des Ensembles, der Ästhetik der Reflektion beider und deren Einbettung in das Umfeld. Sie ist somit eine interessante Schnittstelle zwischen dem urbanen Umfeld und dem Menschen als Bewohner und Gestalter. Diese

Schnittstelle unterliegt hochkomplexen Prozessen, die abgesehen von globalen Tendenzen, an den sehr unterschiedlichen regionalen Voraussetzungen entschieden werden muss.

Für die Bewertung der Attraktivität von Gebäuden als Körper im städtischen Raum sind die folgenden allgemeinen Aspekte und deren Einordnung ins Umfeld zu berücksichtigen:

1. Urban Design und Townscape: Stadtbildarchitektur, vorhandene und/oder geplante Gestaltung von Gebäudegruppen, Stadtteilen und öffentlichen Räumen, die Voraussetzungen für das attraktive Leben des Menschen in seiner städtischen Umwelt schaffen.
2. Built Environment: Von Menschen geschaffene Umweltbedingungen, die die Attraktivität des Lebens verbessern/verschlechtern (Parks, Infrastruktur, Versorgung, energiefreundliche Versorgung vs. Industrie-, Straßen-/Fahrbahnnähe/Haupttrassen u.a.).
3. Perception/Wahrnehmung: Dieser - auch dem Zeitgeist unterzogene - Faktor ist an soziologisch-physiologische Wahrnehmungen der Körper und Räume einer Stadt gebunden.

Urbane Räume und Körper wie die Gebäude formen die physische Umwelt der in der Stadt lebenden Menschen. Mit der Bewertung der Wahrnehmung dieser Elemente beschäftigen sich Wissenschaftszweige wie die Wahrnehmungspsychologie, die ästhetische Psychologie und die Umweltpsychologie. Dabei zeigt sich, dass bei der Beantwortung der Frage nach der Attraktivität von urbanen Strukturen, Bewohner städtische Räume und Körper ähnlich wahrnehmen und in ähnlicher Weise darauf reagieren (WOLTER, 2006). Die Ästhetik der Lebensumwelt hat eine große Bedeutung für die Wahrnehmung der Wohn- und Lebensqualität. Zahlreiche Autoren zeigten diesen Zusammenhang auf (BERLYNE, 1971; NASAR, 1988, 1994; MADERTHANER, 1998; SCHNEIDER, 1990; WOLTER, 2006).

Gebäudeästhetik

Die Art und Weise nach der städtische Strukturen und speziell Gebäude beim Betrachter Wohlbefinden erzeugen, wird im Rahmen der ästhetischen Psychologie untersucht. Sie behandelt ästhetische Reaktionen auf Räume, Formen, Farben, Umweltbedingungen und weitere Faktoren. Zumeist resultieren die Einordnungen aus Erhebungen von Befragungen von Personen (Laien und Architekten) zu verschiedenen ästhetischen Aspekten. Einer der herausragenden Vertreter dieses Wissenszweiges ist Jack L. Nasar von der Ohio State University, Columbus. In seiner Arbeit aus dem Jahr 1994 setzt sich NASAR mit der ästhetischen Bewertung der Qualität von Gebäudehüllen (building exteriors) auseinander. Er spiegelt Gebäudeattribute mit Wahrnehmungsfaktoren von Betrachtern. Der Betrachter bringt hierbei spezifische Voraussetzungen ein, die sich aus seiner Persönlichkeit, Befindlichkeit, Intentionen sowie seiner kulturellen Erfahrung ergeben. Bei der Betrachtung des Gebäudekörpers nimmt er dessen Attribute wahr, lässt aber auch die von ihm eingebrachten Kenntnisse in dessen Bewertung einfließen. Aus dieser Situation resultieren emotionale Reaktionen und affektive Bewertungen, die in eine ästhetische Antwort (aesthetic response) münden. NASAR (1994) unterteilt die Wahrnehmung in zwei Formen, die er formale Ästhetik und symbolische Ästhetik nennt und auf Arbeiten von LANG (1988) zurückführt.

Attribute der formalen Ästhetik sind Form, Proportion, Rhythmus, Maßstab, Komplexität, Farbe und viele weitere Faktoren, die eine Bewertung nach messbaren Größen erlauben. NASAR definiert aufbauend auf Arbeiten von BERLYNE (1971) und KAPLAN & KAPLAN (1982) sowie verschiedenen andern Publikationen folgende Variablen, die zur Charakterisierung herangezogen werden können (NASAR, 1994):

- Gebäudeumfeld (Offenheit, Weiträumigkeit, Dichte, Rätselhaftigkeit)
- Gebäudekomplexität (Diversität und Vielfalt, visueller Reichtum, Ornamente und Verzierungen, Informationsrate)
- Ordnung (Einheitlichkeit, Ordnung, Klarheit der Strukturen)

Im Unterschied zur formalen Ästhetik greift die symbolische Ästhetik auf Abbildungen des menschlichen Erfahrungsschatzes zurück und reflektiert die individuelle Wirkung des Gebäudes auf den Betrachter. Dabei können verfügbare Erfahrungen, abrufbare Vergleiche, kulturelle Prägungen u.a. eine wesentliche Rolle spielen. Die symbolische Ästhetik ist deshalb von verschiedenen subjektiven Faktoren, die das Individuum einbringt, abhängig. Zu den Variablen, die NASAR (1994) hier definiert, gehören:

- Natürlichkeit
- Unterhaltung (Pflege- und Wartungszustand)
- Nutzungsfrequenz
- Stil

Die drei ersten unter ihnen vereinen die Wahrnehmung natürlicher und künstlicher Einflüsse auf Gebäude und umgebende Szenen. So werden z.B. häufig natürliche Umgebungen (natürliche Materialien, urbanes Grün u.a.) positiver wahrgenommen. Auch hier kann die Fernerkundung wichtige Bewertungsdaten liefern. Diese können das Gebäude umschließende urbane Grün, Bewertung Alt- vs. Neubau sowie die Nutzungsart und die sich aus ihr ableitende Nutzungsfrequenz (z.B. Industriegebäude oder Wohnhaus) sein.

In der empirisch-psychologischen Ästhetik wurden Elemente einer empirischen Begründung der Wahrnehmungsästhetik formuliert. Diese in der Folge beschriebenen Ansätze wurden in der Arbeit von HAHN (2009) übersichtlich zusammengefasst, die von MADERTHANER betreut wurde. Sie geht auf frühe Arbeiten von FECHNER (1871) zurück, der Prinzipien der Ästhetik begründete (Schwelle, Übersumptionsprinzip, Einheit, Konsistenz, Klarheit, Assoziation). Eine weitere Formulierung geht auf RICHTER (2008) zurück, der Gestaltungsgesetze für das Verständnis der Wahrnehmungsprozesse definierte (Gesetze der Einheit, Ähnlichkeit, Kontinuität, gemeinsames Schicksal, Einstellung, Figur und Grund). In der experimentellen Ästhetik werden die Zusammenhänge zwischen der ausgelösten Erregung und den hedonistischen Werten, Aversionen und Wahrnehmungsverstärkungen untersucht (BERLYNE, 1971; 1974), wobei ein hoher hedonistischer Wert (Hedonismus = Lust & Freude) einer positiven Wahrnehmung entspricht. Abbildung 2.1 zeigt diese Zusammenhänge.

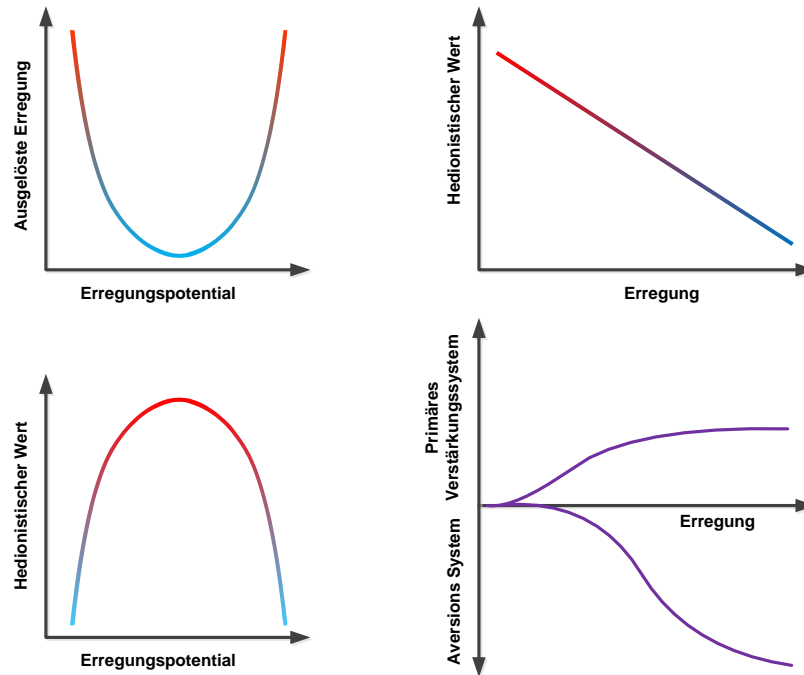


Abb. 2.1 Visualisierung von Erregungspotential, Aversion und hedonistischem Wert.

Oben: Postulierter Zusammenhang von Erregungspotential und ausgelöster Erregung (links) und von Erregung und hedonistischem Wert (rechts); Unten: Postulierter Zusammenhang von Erregungspotential und hedonistischem Wert (links) und Zusammenwirken des primären Verstärkungs- und Aversionssystems (rechts) nach BERLYNE, 1974.

Nach BERLYNE (1974) vermittelt die Erregungskomponente zwischen dem auslösenden Reiz und dessen Wirkung. Ein hohes Erregungspotential (rot) korrespondiert sowohl mit hoch neuartigen und komplexen als auch mit gering neuartigen und komplexen Reizen. Wohingegen mittelmäßig neuartige und komplexe Reize zu niedrigeren Erregungen (blau) anregen. Die Erregungskurve lässt sich in hedonistische Werte in Abhängigkeit vom Erregungspotential transferieren. So entsteht die klassische U-Form der Hedonismus-Erregungskurve mit positiven Wahrnehmungen (Abb. 2.1 links unten rot). Das komplexe Wechselspiel zwischen positiver Wahrnehmung und Aversion zeigt schließlich die Abb. 2.1 (rechts, unten). Während sich ein positives Wahrnehmungsvermögen mit steigender Erregung asymptotisch einpegelt, erzeugt eine negative Wahrnehmung bei hoch und gering neuartigen komplexen Reizen, eine mit der Erregung zunehmende Aversion. Die Theorie von BERLYNE wurde unter Berücksichtigung des Kontextes zur Ökologie und der empirischen Überprüfbarkeit weiterentwickelt (RITTERFELD, 1996: 17ff.). In einer sehr vereinfachten Interpretation assoziiert diese Interrelation eine Prämisse der Beurteilung zugunsten des Erhalts einer gewissen Harmonie bei der Einführung neuartiger Strukturen. In der umweltästhetischen Konzeption (KAPLAN, 1987) kommen stabile Bedürfnisse nach Sinn und Ordnung hinzu, die sich am Grad der Komplexität (Vielfalt und Anzahl von Elementen der Umwelt) von Strukturen und in der psychologischen Kohärenz ihrer Wahrnehmung zeigen (HAHN, 2009: 43f.).

Gebäudewahrnehmung

NASAR (1994) vertritt die These, dass Szenen, Situationen und Körper als attraktiv wahrgenommen werden, wenn sie von mittlerer Komplexität sind. Das entspricht der U-Form der Abbildung 2.1. Das heißt, dass ein ausgewogenes Verhältnis von Ordnung und Vielfältigkeit

existieren muss (WOLTER, 2006). Man könnte diesen Zustand auch als Zustand einer gewissen räumlichen Harmonie bezeichnen. MADERTHANER (1978) untersuchte die Bedeutung von Monotonie und Komplexität aus der Befragung von Versuchspersonen. Auch er schlussfolgerte, dass ein mittleres Komplexitätsniveau einen großen Einfluss auf die ästhetische Wahrnehmung von Gebäuden hat. Er schlussfolgerte, dass die Komplexität die Wahrnehmung zu 50% beeinflusst, während die Gebäudestruktur diese nur zu 20% beeinflusst. Diese Untersuchung wurde aus Befragungsergebnissen an Architektur- und Studenten anderer Zweige von IMAMOGLU (2000) in der Türkei an Architekturzeichnungen bestätigt, deren Sichtung und Einschätzung ergaben, dass mittlere Niveaus an *Komplexität* bevorzugt werden. Bevorzugung eines mittleren Komplexitätsniveaus beschreibt auch AKALIN et al. (2009). In ihrer Arbeit analysiert HAHN (2009) weitere Arbeiten zur Architekturästhetik zwischen 2006 und 2009. Der Einfluss der Fassaden wird von HELFER (2006) und NEUBAUER (2006) avisiert, die aus der Schule von MADERTHANER stammen. HELFER und NEUBAUER kommen zu dem Urteil, dass je vertrauter und vielfältiger eine Fassade aussieht, desto besser sei ihr Gesamteindruck, weshalb auf Vielfältigkeit, Ordnung und Struktur bei Fassadengestaltungen zu achten sei. Weiterhin wird die Ensemblewirkung von Fassaden nach den Schwerpunkten Komplexität, Kontrast, Symmetrie, Ordnungsfaktoren und Gruppierungseffekten untersucht. Die Ergebnisse sind ebenfalls in der Arbeit von HAHN (2009) dokumentiert. Aus diesen Arbeiten ergaben sich die Variablen: Baustil (modern vs. Traditionell), Farbe (bunt vs. unbunt) und Anordnung (Symmetrie vs. Asymmetrie). Nach HAHN (2009) ergab diese Arbeit (a) eine Präferenz nach dem Baustil und (b) nach Homogenität der Bebauung. Schließlich untersuchte WINTER (1997) die Ästhetik der Gebäude nach Kriterien der Komplexität, Struktur, Farbe, Material und Bauform. Sie zeigte, dass „unmoderne“ und vertraute Gebäude positiv bewertet werden, große, monotone Wohnblocks und Wohnanlagen hingegen negativ wahrgenommen werden. WOLTER (2006) klassifizierte in ihrer Arbeit Gebäude nach Kriterien der *Umschlossenheit* (hoch, niedrig, gering), dem *Raumformat* (Höhe, Breite) und der *Raumoberkante* (Variabilität der Bebauungshöhe). Auch sie konnte einen Zusammenhang zwischen positiver Wahrnehmung und mittlerer Komplexität replizieren. WOLTER (2006) schlussfolgerte: „Die Auswertung der Rangreihen brachte sehr eindeutige Resultate zum Einfluss der unterschiedlichen Variablen auf die Bewertung der einzelnen Serien hervor. Die im Originalzustand kontinuierlich umschlossenen Räume in Vällingby und Berlin, die zu dem über eine weitgehend durchlaufende Raumoberkante und, zumindest im Beispiel Vällingby, über eine außerordentlich homogene Architektur verfügen, wurden eindeutig besser bewertet, wenn der Raum, bei gleich bleibend flachem Raumformat, etwas geöffnet und die Raumhülle stärker gegliedert wurde. Negativ wurde hingegen eine Verstärkung der räumlichen Geschlossenheit durch eine Erhöhung der Baukörper bewertet. Dagegen wurde der Hauptplatz in Wien, der im Originalzustand zwar ebenfalls weitgehend umschlossen, dessen Architektur aber wesentlich heterogener ausgebildet ist, besser bewertet, wenn die räumliche Umschlossenheit durch eine Erhöhung der Baukörper verstärkt wurde. In dieser Serie wurden die Varianten schlechter bewertet, die eine stärkere räumliche Öffnung präsentierten.“

Wahrnehmung des Wohngebäudeumfeldes

Neben den Aspekten der gebäudebezogenen Ästhetik und ihrer Wahrnehmung sind weitere Faktoren des Wohnumfeldes entscheidend für die Qualität des Wohnstandortes. Sie runden das Bild nachhaltiger urbaner Stadtformen ab. Vor dem Hintergrund einer ganzheitlichen Betrachtung des Wohnumfeldes diskutierte MADERTHANER (1998) die Kriterien für Wohlbefinden, Lebensqualität und Umwelt. Er hob hervor, dass für das Wohlbefinden die Wahrnehmungen des

Glücks und der Zufriedenheit maßgeblich sind. Für die Lebensqualität sind lebensraumbezogene Bedürfnisse, die Möglichkeit der Regeneration, der Privatheit und Sicherheit, der Funktionalität und Ordnung, der Kommunikation, Aneignung und Partizipation sowie der Ästhetik ausschlaggebend. Zu den Umfeld bezogenen Faktoren der Beurteilung der städtischen Wohnqualität gehören neben der Kompaktheit und Dichte der Bebauung, ein nachhaltiges Transportsystem zur städtischen Versorgung und zum Personentransport, Konzepte einer gemischten Landschaftsnutzung (Wohngebäude, Gewerbe, Versorgung, Spielplätze, Kulturzentren etc.), eine ausgewogene Vielfältigkeit sowie Begrünung (Parks, Grünanlagen, Wiesen, Straßenbäume etc.) und Wasser (Seen, Flüsse, Kanäle, Badeanlagen etc.) (JABAREEN, 2006). In erheblichem Maße sind auch Faktoren zur Gestaltung ökologischer Stadtstrukturen von primärem Interesse (eco-city). Dieser Bereich hat sehr vielfältige Facetten, beginnend von Trassenoptimierung, der Verkehrsteuerung und Abgasminimierung, der Begrünung, der Nutzung von Solarenergie bis hin zu ökologischen städtischen Managementstrukturen. Untersuchungen zur Nachhaltigkeit urbaner Formen von JABAREEN (2006) und BRAMLEY & POWER (2009) beschäftigen sich unter Einbeziehung aller dieser Faktoren mit der Ganzheitlichkeit städtischer Strukturen. Hier ist das Gebäude Unterelement einer Gesamtbetrachtung. JABAREEN (2006) kommt zu dem Schluss: „Die ideale und nachhaltige Stadtform ist jene, die sich gleichzeitig durch eine hohe Dichte und eine hohe adäquate Vielfältigkeit auszeichnet. Sie ist kompakt und integriert unterschiedliche Nutzer und Verbraucher. Sie basiert auf einem nachhaltigen Verkehrs- und Umweltkonzept, das Begrünung und ökologische Energiegewinnungs- und Verteilungsstrategien integriert“ [englisches Originalzitat: „The ideal sustainable urban form is that which has a high density and adequate diversity, compact with mixed land-users, and its design is based on suitable transportation, greening, and passive solar energy.”].

2.2 Gebäudebezogene Klassifikation der urbanen Morphologie

Die Struktur eines städtischen Gebäudes oder von Gebäudekomplexen hat einen erheblichen Einfluss auf die Qualität seiner urbanen Umgebung. Messbare Faktoren der Gebäudeanordnung, der Gebäudehöhen und des Designs sind wichtige Werkzeuge für die urbane Gestaltung und die Bewertung der regionalen Wohnqualität. Weiterhin ist der Kontext des Gebäudeumfeldes zu berücksichtigen, der diese Qualität ebenfalls entscheidend beeinflussen kann. In diesem Abschnitt werden zunächst Methoden und Verfahren der Gebäudeextraktion und -bewertung behandelt und anschließend, auf den Stand der Forschung der in dieser in der Arbeit angewendeten fernerkundlichen Methoden eingegangen.

Verfahren der Gebäudeklassifizierung

Bei der Gebäudeklassifizierung gewinnen zunehmend Bildinformationen an Bedeutung. Diese können sowohl terrestrisch (vom Boden aus) als auch fernerkundlich (Luft- oder Satellitenbild) erhoben werden. Natürlich sind weiterhin klassische Vermessungsverfahren am Boden für die Validierung von Gebäuden wichtige Methoden zur Ermittlung von deren Attributen. Da diese in der Arbeit (bis auf Referenzen) keine zentrale Rolle spielen, werden sie nicht im vorliegenden Kapitel ausgeführt. Die Methoden fernerkundlicher Analysen und der Stand der Wissenschaft auf diesem Gebiet werden im Kapitel 3 detailliert diskutiert.

Messbare Größen von Gebäuden und Gebäudestrukturen mit Luftbilddaten

In einer Arbeit von KNAPP et al. (2005) werden die multi-disziplinären Messgrößen für das urbane Wachstum thematisiert. Die Autoren betrachten die städtische Struktur, die städtische Dichte und

deren Variationen. Sie definieren messbare Größen, um Verteilungen beobachtbarer Werte zu eruieren. Zu ihnen gehören ausführliche Betrachtungen zur urbanen Dichte, der Mischungen von Wohnnutzungskonzepten, der Lage des Wohnstandortes und der verkehrlichen Anbindung. Zu den messbaren Größen gehören die folgenden Kategorien: (a) Dichtefunktionen (Bevölkerung, Häuser, etc.), (b) Dichte der urbanen Anordnungen, (c) Diversität, (d) Verkehrliche Infrastruktur Erreichbarkeit von Lokalitäten, (e) Gebäudedesign, (f) Umfeld. Zwei dieser Kategorien betreffen die Fragestellung der Arbeit explizit: (I) das Gebäudedesign und (II) das Gebäudeumfeld. Eine primär gebäudebezogene Bewertung der Nahwirkung städtischer Architektur wird von GEHL et al., (2006) diskutiert. Die Autoren setzen sich mit der Wirkung der Gebäudemaße, der Transparenz des Designs, der Funktion und externer Bedingungen (Klima, Beleuchtung etc.) in Abwägung mit Wirkungsfaktoren wie der räumlichen Anordnung von Gebäuden, den „Rhythmus“ der Stadtgestaltung, der Fassaden und deren Materialien u.v.a.m. auseinander. Anhand vielfältiger Beispiele kommen sie zu dem Schluss, dass eine gute Nahfeldwirkung städtischer Architektur eine wesentliche Grundlage für eine positiv wahrgenommene Stadt ist. CLIFTON et al., 2008 beschäftigen sich in einer Übersichtsarbeit mit der quantitativen Analyse des urbanen Kontextes. Unter anderem thematisieren sie den Umstand, dass die Bewertung des städtischen Designs objektiven und subjektiven Kriterien folgt. Objektive Faktoren umfassen primär auch messbare Größen wie Details der Gebäudegestaltung (Design, geometrische Maße etc.) und des Gebäudeumfeldes (natürliches Umfeld). Subjektive Faktoren schließen oft physikalisch nicht messbare Wahrnehmungsbezüge ein, deren Bewertung komplex ist. Deshalb liegt dem finalen referenzieren meist eine Bewertung durch Gruppen von Testpersonen zugrunde. Zu den gebäudespezifischen physischen und messbaren Merkmalen zählen CLIFTON et al., 2008 insbesondere die Gebäudehöhe. Die Konsistenz von Gebäudehöhen und deren Variation ist ein wichtiges Maß für die Kohärenz des Designs und somit auch für eine positive Bewertung der Attraktivität. Das steht in Übereinstimmung zu den im Abschnitt 2.1 diskutierten Analysen von WOLTER (2006). Andere Größen sind die Bebauungsdichte, Flächennutzung und eine ausgewogene Diversität der Bebauung. SCHIRMER & AXHAUSEN (2014) diskutieren quantitative Ansätze zur Beschreibung der urbanen Morphologie. Sie klassifizieren hierzu Attribute, die sie in verschiedenen Skalenlängen betrachten und am Beispiel eines Züricher Kantons demonstrieren. Ihr Modell ist objektbasiert und analysiert sowohl Blocks als auch Einzelgebäude. Weiterhin werden Straßenzüge integriert. Blöcke und Gebäude werden durch Polygone repräsentiert. Im Anschluss werden Informationen über deren Volumen, das topologische Skelett, die Dichte und Homogenität ausgewertet. Auch in diesem Ansatz werden folglich die schon von CLIFTON et al., 2008 messbaren Gebäudegrößen zugrunde gelegt. WURM (2013) erweitert den Ansatz zur Untersuchung gebäudespezifischer Strukturen durch Analysen von zusätzlichen Formmerkmalen. Neben den bereits genannten Merkmalen wie Fläche, Höhe, Höhenvariation und Volumen wird auch der Gebäudeumfang betrachtet. Des Weiteren werden Korrelationen dieser Formmerkmale analysiert (Flächen-Umfang, fraktale Dimension, Umfangindex, Kompaktheit, Symmetrie u.a.) und deren Häufigkeitsverteilung diskutiert. Verschiedene dieser Maße können mit den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Attraktivitätsmerkmalen korreliert sein.

Unter Berücksichtigung der im Kapitel 3 beschriebenen Daten lassen sich folglich die in Tab. 2.1 zusammengefassten Korrelationen betrachten

Variable	Attraktivitätskriterium: hoch/mittel/gering	Quelle
Raumformat der Gebäude Fläche Höhe	Kompaktheit/Komplexität: mittel/hoch oder gering	BERLYN (1974) MADERTHANER (1998) WOLTER (2006) SCHIRMER (2014)
Höhenvariation und Durchgängigkeit der Raumoberkante	hoch/mittel/gering	WOLTER (2006) SCHIRMER (2014)
Umschlossenheit des Bebauungsraumes	hoch/mittel/gering	WOLTER (2006)
Bebauungsdichte	mittel/gering	MADERTAHANER (1998)
Symmetrie	symmetrisch/asymmetrisch	SCHMELZER (2008)

Tab. 2.1 Korrelation von einigen messbaren Gebäudeattributen und Attraktivitätsmerkmalen.

Die Korrelationen zwischen Gebäude- und Attraktivitätsmerkmalen ergeben sich folglich aus messbaren Größen wie den Gebäudeflächen, -höhen, -volumina, der Bebauungsdichte, der Kompaktheit und Umschlossenheit. Weiterhin kann der Charakter von Dachstrukturen (Flach- und Schrägdach) sowie in eingeschränktem Maße die Präsenz von Balkonen und Terrassen untersucht werden. Zusätzliche Attribute, die mit dem Gebäudedesign (Fassade, Architektur etc.) und dem Gebäudezustand (Alter der letzten Renovierung etc.) einhergehen, erfordern zusätzliche Informationen wie den Einsatz der True Oblique Orthomosaik Technik mit Schrägluftbildern, die hier nicht zur Verfügung stand.

Fernerkundlich messbare Größen von Gebäuden im ökologischen Kontext

Neben den rein gebäudebezogenen Messgrößen zur Bewertung der Attraktivität spielt der umweltliche Kontext eine ebenso bedeutende Rolle für die Bewertung des Wohnumfeldes. Nach KNAAP et al., (2005) sind hierbei besonders Stadtbäume und ihr Einfluss auf das lokale Stadtklima zu berücksichtigen. Ebenso sind vorhandene Parkanlagen, Grünflächen, Dachbegrünungen, Wasserflächen, Kunstobjekte und moderne Energieversorgungsanlagen (Solarenergie u.a.) positive Faktoren für die Bewertung des Wohnumfeldes. Hingegen können nahe Industrieanlagen, parkende Autos, nahe verkehrliche Trassenführungen oder veraltete Individualbeheizung (Kohleheizung), um nur einige zu nennen, negativ zur Bewertung des Wohnumfeldes beitragen. JABREEN (2006) z.B. betont die Rolle nachhaltiger Energiekonzepte wie das der Nutzung von Sonnenenergie für moderne Stadtkonzepte. Gleichzeitig werden Gebäudeanordnungen, die eine optimale Stadtbelüftung und Beleuchtung befördern, die optimale Distanz zu Straßentrassen berücksichtigen, Wärmezufuhr und -verlust optimieren und Vegetations- und Wasserkörper integrieren als nachhaltig für ein Stadtkonzept bewertet. Der „grünen Stadt“ kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Ein grünes Gebäudeumfeld trägt nicht nur zum subjektiven Wohlbefinden seiner Bewohner bei, es ist auch aus stadtoökologischer Sicht für das regionale Klima von Bedeutung. Stadtgrün verbindet die Menschen mit ihrem natürlichen ökologischen Umfeld und betont eine hohe Qualität von Nachbarschaft und Gemeinschaft. CLIFTON et al., (2008) betrachten zusätzlich die Relationen urbanen Designs mit der gesamten Landschaftsökologie im globaleren Kontext.

Variable	Attraktivitätskriterium: hoch/mittel/gering	Quelle
Umfeldbegrünung	hoch/mittel/gering	MADERTHANER (1998) JABREEN (2006) BRAMLEY & POWER (2009)
Dachbegrünung	hoch/mittel/gering	Eigene Definition
Nähe zu Gewässern	hoch/mittel/gering	Eigene Definition
Nähe zu Industrie- und Gewerbeanlagen	fern/mittel/nah	MADERTAHANER (1998)
Nähe zu Hauptverkehrswegen Aus Sicht der Mobilität Aus Sicht der Lärmbelästigung	nah/mittel/fern fern/mittel/nah	BRAMLEY & POWER (2009)
Öko-City-Konzepte Solaranlagen	häufig/selten	JABREEN (2006)

Tab. 2.2 Korrelation von einigen messbaren Attributen des Gebäudeumfeldes und Attraktivitätsmerkmalen.

Die Korrelation von Attraktivitäts- und Umfeldattributen ergeben sich hier aus vorhandenen Vegetationsflächen, der Nähe der Wohnanlagen zu solchen Flächen (Parks, Wiesen, Blumenrabatten etc.), aus der Nähe zu Gewässern als Naherholungsanlagen, aus der Verfügbarkeit wohnhausnaher „green spots“ (Balkone, Terrassen, grüne Dächer etc.), aus (detektierbaren) Anlagen die ökologische Stadtkonzepte unterstützen (Solaranlagen etc.) sowie der nötigen Gestaltung und Distanz zu städtischen Industrie- und Gewerbeanlagen und lärm- und anderen umweltbelastenden Objekten (nahe und frequentierte Straßenführungen etc.).

2.3 Offene Fragen für die fernerkundliche Attraktivitätsanalyse von Gebäuden

Die Diskussion der vorangegangenen Abschnitte des Kapitels hat gezeigt, dass die Beurteilung der Attraktivitätsmerkmale von Wohngebäuden für eine Bewertung des Wohnstandortes unterschiedliche Wissenschaftsgebiete zusammenführt, zu denen sowohl sozialpolitische, wahrnehmungspsychologische, verkehrliche, ökologische und vermessungstechnische Zweige gehören. Die Synergien dieser Zweige zu nutzen und die Daten zu einem verwertbaren Produkt zusammenzuführen, ist anspruchsvoll. Zur Validierung der Attraktivitätsattribuierung von Gebäuden in urbanen Bereichen wurden in der Vergangenheit vorwiegend terrestrisch erhobene Daten der Objekte eingesetzt. Diese raumbezogenen Vektordaten konnten in Verbindung mit Abfragen zur Wirkung von Gebäuden auf Gruppen von Testpersonen analysiert werden. Dennoch sind solche Untersuchungen exemplarisch und konzentrieren sich meist auf ausgewählte Areale/Städte. Verallgemeinerungsfähige Ergebnisse werden nur von einigen der oben angeführten Autoren, projiziert auf den jeweiligen Wissenschaftszweig, thematisiert. Der räumliche Bezug der Daten reduziert sich also häufig auf herkömmliche, terrestrisch und statistisch erhebbare Raumeinheiten, deren flächendeckende Einbindung sich oft auf traditionelle Landbedeckungs- und Nutzungsverfahren stützt.

Kombinationen von Fernerkundungs- und Vektordaten zur Gebäudeklassifizierung kommen in den letzten Jahren zunehmend zum Einsatz (Luftbilder und Erdbeobachtungsdaten). Viele Arbeiten (siehe Kapitel 3) beschäftigen sich methodisch mit der Ableitung von Gebäudestrukturen aus digitalen Geländemodellen auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten, die in objektbasierte Klassifikationen münden. Der Einsatz fernerkundlicher Methoden zur Analyse von

Attraktivitätsmerkmalen ist jedoch nur rudimentär entwickelt. Ihre Ermittlung und Verknüpfung zu den Gebäudeobjekten auf der Grundlage kleinräumiger Analysen aus Fernerkundungsdaten ist deshalb Neuland. Weiterhin stellt sich die Frage, ob beim Verzicht einer Verknüpfung der Fernerkundungsdaten mit Vektordaten und bei ausschließlicher Nutzung der fernerkundlichen Rasterdaten, valide Aussagen zur Attraktivität von Gebäuden in urbanen Räumen getroffen werden können.

Die Innovation der vorliegenden Arbeit liegt in diesen beiden Herausforderungen. Sie umfassen eine automatisierte, objektbasierte Gebäudeklassifizierung, die ausschließlich auf Luftbild-Rasterdaten und einem normierten digitalen Oberflächenmodell basiert und eine Attribuierung von Attraktivitätsmerkmalen der Gebäude und ihres Umfelds.

3 Datengrundlage

Das Kapitel drei begründet die Datenauswahl, beschreibt das den Daten zugrundeliegende Aufnahmesystem der *UltraCam X*, die Befliegungskampagne und die sich daraus ableitenden Bildprodukte sowie die Untersuchungsgebiete. Weiterhin wird die photogrammetrische Prozessierung des verwendeten digitalen Oberflächenmodells (DOM), des True Ortho Mosaics (TOM) und des normierten digitalen Oberflächenmodells (nDOM) beschrieben. Die Eigenschaften aller Daten werden ausführlich diskutiert. Besonders wird dabei die Wahl der Daten bezüglich der Nutzbarkeit für die Extraktion urbaner Gebäudestrukturen und deren Typisierung kritisch analysiert und bewertet. Weiterhin wird die Auswahl der beiden Untersuchungsgebiete anhand der Flächennutzung des Berliner Umweltatlas der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt diskutiert. Schließlich wird der für die spätere Genauigkeitsanalyse verwendete Referenzdatensatz der automatisierten Liegenschaftskarte vom Raum Berlin (ALK) beschrieben. Die vektoriellen Referenzdaten wurden vom Verkehrsforschungsinstitut des DLR, Berlin und die photogrammetrisch prozessierten Rasterdaten der UltraCam X einschließlich des nDOM, des TOM (RGB und IR) sowie der Count Maske vom Institut für Optische Sensorsysteme des DLR, Berlin bereitgestellt.

Die folgenden Ausführungen zum Kamerasystem, zur Befliegungskampagne, den Bildprodukten, Grundzügen der Prozessierung des DOM, TOM und nDOM sowie der abgeleiteten Datenprodukte (Abschnitte 3.2 – 3.5) beruhen im Wesentlichen auf der Arbeit von POZNANSKA & BAYER (2014), die diese Aspekte umfassend beleuchtet. Weitere Quellen werden in diesem Kapitel gesondert ausgewiesen.

3.1 Begründung der Datenauswahl

In diesem Abschnitt wird die Auswahl des Datensatzes hinsichtlich der Aufgabenstellung einer automatisierten Extraktion und Typisierung von Gebäudestrukturen im urbanen Raum Berlin beschrieben. Es werden Sensorsysteme und ihre Produkte kritisch auf ihre Eignung zur Untersuchung der Fragestellung der Arbeit analysiert und bewertet.

Anforderungen an den Datensatz

Für die präzise Extraktion und Attribuierung von Objekten (Vegetation, Gebäude etc.) auf der Erdoberfläche aus Fernerkundungsdaten ist ein digitales Oberflächenmodell (DOM) unerlässlich. Erst durch das Referenzieren der Objekte auf ein einheitliches Grundhöhenniveau gelingt es, die Dimensionen der einzelnen, sich auf der Erdoberfläche befindlichen Strukturen auch dreidimensional und exakt zu erfassen. Eine solche dreidimensionale Erfassung ist eine Voraussetzung für die Bearbeitung des Themas zur Gebäudeextraktion. Des Weiteren müssen die Daten eine hinreichend hohe räumliche Auflösung haben, um Gebäude und auch Gebäudesubstrukturen (Balkone, Dachkonstruktionen u.a.) ermitteln zu können. Da diese Substrukturen Dimensionen unterhalb eines Meters haben können, ist eine Messung im Zentimeterbereich wünschenswert. Neben der Objekterkennung bieten weitere Eigenschaften der Objekte die Möglichkeit Gebäude zu unterscheiden und zu klassifizieren. Thematische Informationen zur Objektattribution können Farbvariationen (RGB) oder Spektralunterschiede (multi- und hyperspektral) sein, die es erlauben, die Klassifikation zu verbessern und zu verfeinern. Das gelingt durch eine synergetische Datenfusion der detektierten Objektstrukturen und der ermittelten thematischen Eigenschaften. Wichtige Zusatzinformationen bietet die spektrale Diskriminierung zwischen Vegetations- und nicht-Vegetationsobjekten oder eine

Analyse von Farbvariationen. Es ist deshalb vorteilhaft, einen Datensatz zu wählen, der diese thematischen Daten zugänglich macht. Im Hinblick auf die Zeitauflösung sind die Anforderungen an die Daten moderat.

Vergleich relevanter Fernerkundungsdatensätze

Im Folgenden werden die wichtigsten Messverfahren, die für die Erzeugung von einem DOM und die sich daraus ableitende fernerkundliche Analyse von Gebäudeobjekten Verwendung finden, vorgestellt und bewertet. Unter den einsetzbaren Messverfahren unterscheidet man zwischen passiven und aktiven. Passive Systeme nutzen die Sonnenstrahlung, während aktive Sensoren ihre eignen Quellen haben.

LiDAR

Das LiDAR (Light Detection and Ranging) ist ein aktives Fernerkundungssystem. Es arbeitet mit einem Laser als Sender und einem Empfänger. Es sendet und empfängt elektromagnetische Wellen im Bereich des UV, VIS und IR. Das ausgesandte Signal (Impuls) wird am beobachteten Objekt verändert und die reflektierte Strahlung vom System wieder registriert (LEFSKY et al., 2002). Der Laserstrahl ist scharf gebündelt und erzeugt folglich eine hohe räumliche Auflösung. Die Laufzeit der Signale und die Lichtgeschwindigkeit ergeben die Entfernung zum Ort der Streuung. Es ist also eine Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung (Altimetrie). Ein LiDAR scannt den Untergrund punktförmig ab. Eine hohe Messpunktdichte und die gleichmäßige Verteilung der Messpunkte sind für die Objekterkennung und die Erstellung eines DOM mit hoher Genauigkeit ausschlaggebend. Bei luftgestützten Verfahren zur Gebäudeextraktion im urbanen Bereich wird mit robusten Verfahren eine Auflösung des digitalen Geländemodells im Submeterbereich erreicht. (ROTTENSTEINER & BRIESE, 2002; POLI & CARAVAGGI, 2013). Die Lasermethode erlaubt weiterhin in Vegetationsgebieten sowohl die Morphologie der Vegetationsoberfläche als auch die Struktur des Untergrundes zu untersuchen. Dabei wird die Mehrfachstreuung des Lasersignals genutzt. Laserimpulse werden sowohl von der Vegetationsdecke als auch von bis zur Oberfläche penetrierenden Signalen rückgestreut. Beide haben unterschiedliche Laufzeiten und können separiert werden (EECKHAUT et al., 2007). Somit sind insgesamt geophysikalische Größen, wie Vegetation, die Beschaffenheit des Geländes oder Gebäudestrukturen ableitbar. Da Laserstrahlen jedoch sehr empfindlich auf atmosphärische Parameter, wie Wolken oder Aerosole reagieren, sind sie, ebenso wie passive optische Systeme stark Wetter- abhängig.

Radar Systeme

Das Radar (Radio Detection and Ranging) ist ebenfalls ein aktives Fernerkundungssystem und deckt Mikrowellen im Zentimeter- bis Millimeterbereich ab. Mikrowellenimpulse werden von einer Antenne des Radars gesendet, vom Boden reflektiert und Anteile der reflektierten Signale wieder vom Radarsystem empfangen. Ähnlich wie beim LiDAR ermöglicht die Messung der Impulslaufzeit zwischen Senden und Empfang eine Bestimmung der Entfernung (Altimetrie). Aus dem Antennenwinkel wird die Richtung zum Objekt bestimmt. Das seitwärts beobachtende Radarsystem SLR (*Side Looking Radar*) sendet in einem schmalen, langen Raumwinkel Mikrowellen senkrecht zur Flugrichtung aus. Dabei entsteht eine variable Beobachtungsgeometrie im Nah- und Fernbereich (Radarkeule), die die räumliche Auflösung in Blickrichtung und in Azimutrichtung steuert (SABINS, 1997: 181f.). Bei der Bewegung des Sensors in Flugrichtung entstehen zeilenweise Aufzeichnungen parallel zur Flugrichtung (ALBERTZ, 2001: 58f.). Die räumliche Auflösung solcher Systeme, die auch RAR (*Real Aperture Radar*) genannt werden, ist

direkt proportional zur Antennenlänge und deshalb durch diese Größe festgelegt (SABINS, 1997: 184f.). SAR-Systeme (*Synthetic Aperture Radar*) besitzen kleine Antenne, simulieren aber die Aufnahmen mit einer langen Antenne durch Nutzung des Dopplereffektes. Objekte, die sich innerhalb der Radarkeule in Flugrichtung vor dem Sensor befinden haben wegen des Dopplereffektes eine höhere und hinter den Sensor eine niedrigere Frequenz. Das schnürt die Radarkeule gewissermaßen ein und erhöht die Auflösung (SABINS, 1997: 184). Auch hier ermöglichen flugzeuggetragenen Systeme Bodenauflösungen im Submeter-Bereich (BRENNER & ENDER, 2006).

Die Verfahren der SAR Interferometrie (InSAR) und der differentiellen SAR Interferometrie (dInSAR) ermöglichen eine weitere Verbesserung der räumlichen Auflösung und der absoluten Höhengenaugkeit. Bei Messungen des gleichen Aufnahmegebietes aus variablen Aufnahmepositionen oder mit einem zweiten SAR System werden durch die Signalüberlagerung Interferogramme erzeugt, aus denen sich hochgenaue digitale Geländemodelle berechnen lassen (CATANI et al., 2005; PEPE, 2005). Bei differentiellen InSAR Verfahren wird die Phaseninformation des SAR-Signals ausgewertet. Eine Phasendifferenzmessung entspricht einer Bestimmung des Wegunterschiedes (SPRECKELS et al., 2001: 54).

Satellitengestützte InSAR-Systeme (z.B. TanDEM-X, TerraSAR-X add-on Digital Elevation Measurement) gestatten die Erstellung dreidimensionaler Strukturen im 12-Meter-Raster und luftgestützte Sensoren im Submeter-Bereich. Sie sind für den Einsatz großflächiger Untersuchungen besser als LiDAR Beobachtungen geeignet. Die dInSAR Daten erlauben sogar die Erfassung von Höhenänderungen im Millimeterbereich und sind durch die Wellenlänge des genutzten Radarsignals beschränkt. Aber sie benötigen konstante Phasenbeziehungen, die von Szene der Beobachtung selbst abhängig sind (NIETHAMMER, 2013: 27).

Neben der Objekterfassung und der Rekonstruktion der Objektdimensionen kann auch der Rückstreucharakter des Radarsignals verwandt werden, um die erkannten Objekte zu attribuieren. Das Rückstreuverhalten des Radarsignals wird von der Beobachtungsgeometrie und der Rauigkeit der Oberfläche im Vergleich zur Radarwellenlänge bestimmt. Ist die Rauigkeit im Vergleich zur Wellenlänge gering, gilt die beobachtete Fläche als glatt. Das Radarsignal wird spiegelnd reflektiert. Ist die Rauigkeit groß, wird das Signal gestreut. Dadurch kommt es zu Variationen des rücklaufenden Signals, das am Empfänger detektiert wird (SÖRGEL, 2003: 18f.). Durch den Grad der Streuung können folglich Informationen über den Charakter des beobachteten Objektes abgeleitet werden.

Signaldämpfungen des Radarsignals in der Atmosphäre sind vernachlässigbar. Die Atmosphäre ist in diesem Wellenlängenbereich transparent. Die Beobachtungen sind somit weitgehend von atmosphärischen Parametern und der Wolkenbedeckung unbeeinflusst, was ein Vorteil der Methode im Vergleich zu optischen Verfahren ist (SABINS, 1997: 177f.).

Passive optische Systeme

In der passiven optischen (terrestrischen) Fernerkundung wird die von der Erdoberfläche reflektierte Solarstrahlung im sichtbaren (VIS) bis in den nahen Infrarotbereich (nIR) und die emittierte thermische Eigenstrahlung des Objektes im infraroten Wellenlängenbereich (IR) erfasst. Die natürliche solare Strahlungsenergie liegt im Wellenlängenbereich zwischen 0,3 und 3 μm mit einem Maximum bei etwa 0,5 μm . Die objekteneigene thermale Ausstrahlung liegt zwischen 3 bis 14 μm . Atmosphärische Fenster der Erdatmosphäre im sichtbaren Spektralbereich, im nIR, und im IR erlauben es, diese Signale fernerkundlich zu erfassen. Abbildende passive optische

Sensoren erzeugen Bildinformationen. Ihre erste wesentliche Systemeigenschaft ist die räumliche Auflösung:

$$GSD = \frac{h p}{f}, \quad (3-1)$$

mit GSD – Bodenauflösung (Ground Sample Distance), h – Aufnahmehöhe und f – Fokallänge der Optik (SABINS, 1997: 37f).

Wird bei der Signalregistrierung über alle Wellenlängenbereiche integriert, spricht man von einer panchromatischen Detektion (PAN). Das Signal wird in Grauwerte oder Digital Numbers (DN) übertragen, die die radiometrische Qualität des aufzeichnenden Systems charakterisiert. Hohe radiometrische Auflösungen begünstigen gleichzeitig die räumliche Auflösung des Sensorsystems (JAHN & REULKE, 1995) steht in meinem Bücherregal). Durch Überlappungen von Bildaufnahmen sind digitale orthophotogrammetrische Auswertungen eines stereoskopischen Bildpaares möglich. Daraus lässt sich dann im Weiteren ein DOM erzeugen um Objekte auf der Erdoberfläche dreidimensional abzubilden. Die Erfassung von einer regionalen Stadtebene, über Stadtstrukturebenen, Blockebenen bis hin zur grundrissgenauen Gebäudekartierung ist von der räumlichen und radiometrischen Auflösung des Sensors und von der konkreten Aufgabenstellung abhängig. Aktuelle Bodenauflösungen von Satellitendaten liegen bei panchromatischen Detektionen im Submeter-Bereich (NIETHAMMER, 2013: 21 f). Beim RGB Farbbild wird eine Registrierung im sichtbaren Bereich mit den Wellenlängenkanälen Rot: (630-690 nm), Grün (530-610 nm) und Blau (450-529 nm) vorgenommen. Satellitengestützte RGB-Systeme erlauben zurzeit Bodenauflösungen im Meterbereich (NIETHAMMER, 2013: 21f). Luftgestützte Systeme erreichen in Abhängigkeit von der Einsatzhöhe Bodenauflösungen im Zentimeterbereich. Die momentan gängige erreichbare Bodenauflösung bei flugzeuggetragenen Systemen (Luftbilder und Flugzeugscanner liegt zwischen 10 und 20 cm. Die dritte Systemeigenschaft des abbildenden optischen Systems ist seine temporale Auflösung. Hohe temporale Auflösung bietet Möglichkeiten Zeitreihen zu generieren, um Veränderungen (Change Detection) urbaner Räume und ihrer Umgebung zu beschreiben und zu analysieren.

Der Nachteil von passiven Fernerkundungssensoren liegt darin, dass sie auf die Strahlung der Sonne angewiesen sind. Diese Konstellation macht die Aufzeichnung witterungs- und wetterabhängig und erzeugt ein unbeeinflussbares Muster von Beobachtungs- und Beleuchtungsgeometrien bei der Observation. Das schließt z.B. tageszeitlich und saisonal variable Schatteneffekte ein, die die Detektion und Erkennbarkeit von Objekten stark beeinflussen kann.

Multi- und hyperspektrale Systeme

Multi- und hyperspektrale Sensoren registrieren die Strahlung in diskreten Wellenlängenintervallen. Bereits ein RGB-System kann als multispektraler Sensor betrachtet werden. Je enger und zahlreicher die verwendeten Spektralkanäle werden, geht man von der multispektralen zur hyperspektralen Detektion über. Die räumliche Auflösung wird dabei sukzessive geringer, verglichen mit den panchromatischen Systemen. Multi- und hyperspektrale Sensoren können neben Informationen aus dem visuellen Bereich auch andere Spektralkanäle wie z.B. im Infrarot nutzen. Der Vorteil dieser Systeme ist es, zusätzliche thematische Informationen über das aufgezeichnete Objekt zu generieren. Farbunterschiede, die multispektrale Aufzeichnungen registrieren, können so genutzt werden, um z.B. zwischen Vegetation und Gebäude unterscheiden zu können. Hyperspektrale Sensoren mit abbildendem Charakter zeichnen zudem für jeden Bildpunkt ein Spektrum des Reflexions- oder Emissionsvermögens des

Objektes auf (spectral image cube). Diagnostische Absorptionsbanden können eine Materialidentifizierung des Objektes ermöglichen. Im IR kann zusätzlich die Bestimmung der Objekttemperatur und ggf. die thermische Leitfähigkeit des Objektmaterials ermittelt werden. Dieses sind wertvolle Informationen über das Objekt.

Multisensorkonzepte

Bei der Wahl des Sensorsystems und der resultierenden Datengrundlage es hängt von der Anwendungsfrage und dem Verwendungszweck ab, welches System sich als geeigneter herausstellt. Aktuelle Befliegungskampagnen kombinieren oft unterschiedliche passive und aktive Systeme in einem Multisensorkomplex, um die einzelnen Vorteile der Systeme optimal zu nutzen. Moderne Fernerkundungssysteme für die Anwendung von exakten Objektextraktionen aus hochauflösenden Luftbilddaten und hochgenauen DOM werden ebenfalls immer mehr auf der Fusion verschiedener Datenquellen basieren. Dies ist einer der Gründe, warum in modernen Aufnahmesystemen LiDAR und passive, optische digitale Aufnahmegerate miteinander kombiniert werden.

Für die Interpretation von komplexen urbanen Gebäudestrukturen unter der Verwendung einer objektbasierten Bildanalyse (OBIA) aus Fernerkundungsdaten ist eine Kombination verschiedener Datenquellen ebenfalls empfehlenswert. GAMBA & HOUSHMAND (2002) analysierten die Vor- und Nachteile von Luftbildern, LiDAR und InSAR Daten in Bezug auf die Genauigkeiten des DOM, sowie der Extraktion von Gebäuden und Bodenbedeckung. Es konnte gezeigt werden, dass InSAR eine schnelle Vermessung der Oberfläche vornehmen kann. Dies garantiert jedoch keine hinreichende horizontale und vertikale Auflösung für das DOM und eine Gebäudeextraktion. Das LiDAR hat eine ausgezeichnete vertikale Auflösung. Es müssen aber verfeinerte Algorithmen für die Generierung eines DOM entwickelt werden. Dies steht in Übereinstimmung zu den oben diskutierten Eigenschaften der Einzelsysteme. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Datensätze der aktiven Systeme in Kombination mit multispektralen Luftbildern für Anwendungen im OBIA-Bereich und die dreidimensionale Klassifikation von Gebäuden voneinander profitieren können. Es ist daher von Vorteil ein mehrkanaliges optisches Luftbild (wenigstens RGB) für die Oberflächenmodelle aus den LiDAR oder InSAR Daten zur Verfügung zu haben. Beim Einsatz solcher Multisensorkomplexe muss aber der zum Teil erhebliche Aufwand solcher Kampagnen vor dem Hintergrund der jeweiligen Fragestellung berücksichtigt werden. Er ist nicht nur bei der Erhebung beträchtlich, sondern auch bei der Datenfusion und Validierung, was ein Kostentreiber sein kann.

Da für die Bearbeitung der Arbeit jedoch keine aus LiDAR bzw. SAR-Daten abgeleiteten Oberflächenmodelle von Berlin zur Verfügung standen, wurde auf einen hochauflösenden Luftbilddatensatz und ein daraus abgeleitetes normiertes Oberflächenmodell zurückgegriffen. Diese Luftbilddaten und abgeleiteten Datenprodukte erfüllen die notwendigen Voraussetzungen, die oben diskutierten Anforderungen zu erfüllen. Sie werden im Folgenden beschrieben und analysiert.

3.2 Das Kamerasystem der UltraCam X

Die digitale Luftbildkamera *UltraCam X*, in der Folge UCX genannt (siehe Abb. 3.1), ist eine optoelektronische Flächenkamera (ALBERTZ, 2007: 50). Diese Luftbildkamera mit großflächigen Matrixsensoren aus der UltraCam Reihe wurde im Jahr 2006 von dem österreichischen Technologieunternehmen Vexcel Imaging GmbH (heute Microsoft), Graz, Österreich auf den Markt gebracht (GREIF, 2007). Die Kamerasysteme der UltraCam Serie haben sich seit 2006 als eines der am meisten eingesetzten flugzeuggestützten Kamerasysteme auf dem Markt etabliert.

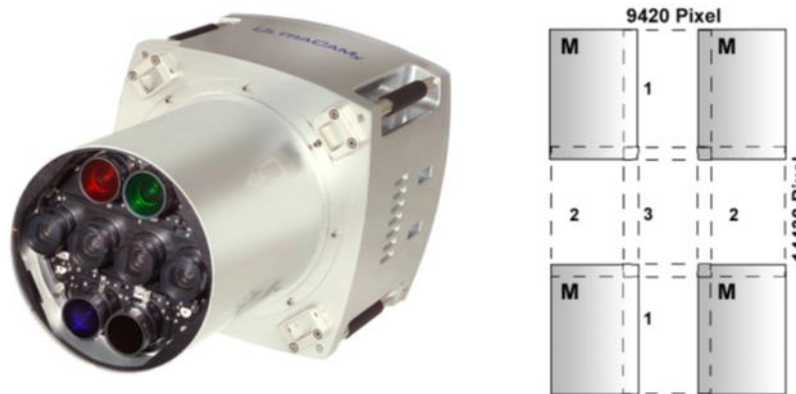


Abb. 3.1 *UltraCam X*: Links: Kamerakopf. Rechts: Aufnahmemuster der Kamera aus GRUBER (2007: 666) sowie LEBERL et al. (2012).

Im Folgenden wird die Kamera nach GRUBER et al. (2008) beschrieben. Die Abb. 3.1 zeigt den Kamerakopf (links) und das Aufnahmemuster der Kamera (rechts). Die UCX ist eine Sensoreinheit mit 8 unabhängigen Kameras. Vier panchromatische Kameras sind zentral in einer Reihe angeordnet.

Panchromatische Sensoren zeichnen das gesamte Strahlungsspektrum im Bereich des sichtbaren Lichts (ca. 400nm bis 780nm) auf. Die Energie der elektromagnetischen Strahlung wird für diese Sensoren integral über den gesamten visuellen Wellenlängenbereich erfasst. Das führt zu einem hohen Signal, das es erlaubt, eine höhere räumliche Auflösung verglichen zu Multi- oder Hyperspektralsensoren zu erzielen. Die panchromatischen Kameras der UCX registrieren ein großformatiges panchromatisches Bild bei einer radiometrischen Auflösung von mehr als 12 Bit. Die vier Kameras sind mit 9 CCDs in ihren 4 Fokalebene bestückt. Die 4 panchromatischen Kameras sind entlang der Flugrichtung (along track) mit parallelen optischen Achsen in einer Reihe in das System integriert. Mehrere in der Sensoreinheit angeordnete Matrixsensoren, die eine Zentralperspektive aufweisen, realisieren die Aufnahme des Luftbildes. Wie das Schema der Abb. 3.1 (rechts) zeigt, entstehen durch das Auslösen der Kamera in einem ein bis zwei Millisekunden Takt pro Aufnahmezyklus neun überlappende Einzelbilder mit dem gleichen Projektionszentrum, die anschließend zu einem finalen panchromatischen Bild mit einer Größe von 14.430 Pixeln (cross track) und 9.420 Pixeln (along track) zusammengeführt werden (SANDAU, 2010: 314).

Ober- und unterhalb der ersten Kameragruppenreihe sind die vier multispektralen Kameras (RGB und nIR) in zueinander parallelen optischen Achsen angeordnet (siehe Abb. 3.1). Diese erzeugen simultan zu den panchromatischen, geringer aufgelöste Aufnahmen der spektralen Kanäle Blau, Grün, Rot und nahes Infrarot (nIR). Ein vor den Objektiven jeder Kamera installierter spektraler Filter zeichnet mit jeweils einer Flächen-CCD Bilder mit den Maßen 4.992x3.328 Pixeln auf. Alle Daten haben ebenfalls eine radiometrische Auflösung von mehr als 12 Bit. Durch ein *Pan-*

Sharpening werden die panchromatischen Daten mit einer hohen Auflösung mit den multispektralen Daten geringerer Auflösung zusammengeführt. Es findet eine radiometrische Transformation statt sowie eine Erhöhung der räumlichen Auflösung durch das Einzelbandbild. Im Ergebnis dieses Prozesses entsteht ein Multiband-Raster-Datensatz mit der geometrischen Auflösung des panchromatischen Datensatzes (14.430x9.420 Pixel).

Für die Erzeugung stereoskopischer Bilder mittels einer Flächenkamera muss ein Überlappungsbereich der Flugstreifen von mindestens 60% in Flugrichtung (Längsüberdeckung) und 30% quer zur Flugrichtung (Querüberdeckung) gewährleistet sein. Nur Bereiche mit Überlappungen können stereoskopisch ausgewertet werden. Die restlichen Bereiche sind für die Auswertung durch Entzerrung und Luftbildinterpretation geeignet. Die Realisierung des Stereobildes erfolgt über die drei autarken Blickwinkel, welche durch den Überlappungsbereich simuliert werden. Die so entstandenen Flugstreifen, können über die vorab definierte Quer- und Längsüberdeckung verknüpft und als zusammenhängendes, großflächiges Luftbild ausgegeben werden. Um eine stabile räumliche Szene zu generieren, gewährleisten drei Sichtstrahlen der drei Blickwinkel des Überlappungsbereiches die Extraktion der homologen Punkte. Dies ist zur Berechnung eines Oberflächenmodells erforderlich. Die Qualität des DOM wird stark von der Größe des Überlappungsbereiches der Einzelbilder beeinflusst. Daher und um die Gefahr von Verdeckungen zu minimieren, empfiehlt es sich, eine Längsüberlappung von 80% und eine Querüberlappung von 70% bei der Befliegung zu gewährleisten (HIRSCHMÜLLER & BUCHER, 2010).

3.3 Befliegung 2010 und Bildprodukte

Die Befliegung für das Innenstadtgebiet von Berlin fand am 23.09.2010 statt. Nachfolgend sind die wichtigsten Flugparameter zusammengefasst:

Kamera- und Produktdaten:

Befliegungsfirma:	BSF Swissphoto GmbH
Kamera / Sensor:	Matrixkamera UltraCam X (Vexcel Imaging GmbH, heute Microsoft)
Bildprodukte:	Echtfarbenbild (RGB) und Infrarotkanal (IR), digitales Oberflächenmodell (DOM)

Erfassungsdaten:

Flugdatum:	23.09.2010
Aufnahmebeginn /-ende:	8.05 - 11:24 Uhr MESZ
Höhe über Grund:	ca. 2090 m
Bodenauflösung:	15 cm (x/y), nachträglich auf 30 cm reduziert
Höhenauflösung:	10 cm (z)
Längenüberdeckung:	80%
Querüberdeckung:	60%
Anzahl der Flugstreifen:	17
Anzahl Aufnahmen insgesamt:	1.793
Aerotriangulation:	Trimble Inpho
Oberflächengenerierung:	SGM (DLR)

Ausdehnung:

geographische Ausdehnung:	445 km ²
---------------------------	---------------------

Koordinatenbereich:

Koordinatensystem:	UTM (Universal Transverse Mercator), Zone 33N
Geodätisches Datum:	ETRS89
Bezugsellipsoid:	GRS80
GPS:	
GPS-Referenzstation:	SAPOS-Station, Berlin-Wilmersdorf
Genauigkeit der GPS-Prozessierung:	Lage und Höhe theoretisch 5-6 cm, realistisch 10 cm

Tab. 3.1 Zusammenfassung der Befliegungsdaten für das Innenstadtgebiet von Berlin 2010 (POZNANSKA & BAYER, 2014: 7).

3.4 Photogrammetrische Prozessierung des digitalen Oberflächenmodells (DOM) und des True Orthophotos (TOM)

Da sich bei Flächenkameras die Eigenschaften der äußeren Orientierung von Bild zu Bild ändern, entsteht pro Bild eine eigene äußere Orientierung (KRAUS, 2004: 201ff.). Die Prozessierung der Orientierungsdaten erfolgte bei der Firma BSF Swissphoto GmbH. Dazu muss die Bildorientierung bekannt sein. Diese ist notwendig, um den Bezug zwischen dem Aufnahmegebiet und dem Luftbild herzustellen. Sie ist die wesentliche Voraussetzung für eine lagegenaue Auswertung, die Verbindung mit anderen Geodaten sowie für die Herstellung von Orthophotos und Höhenmodellen (ACKERMANN et al., 2012: 31). Man unterscheidet zwischen der inneren und äußeren Orientierung. Während die innere Orientierung durch die Aufnahmegeometrie der Kamera gegeben ist, liefert die äußere Orientierung Informationen über die Lage der Bildebene zum Aufnahmezeitpunkt. Das *Global Positioning System* (GPS) und das *Inertial Navigation System* (INS) stellen einen direkten Raumbezug des Kamerasystems her und sorgen zum Zeitpunkt der Bildbefliegung für eine hochgenaue äußere Orientierung.

Die Position der Kamera und deren Bewegungen während des Bildfluges werden mithilfe des INS registriert. Die Flugbahn des Sensorträgers wird über das integrierte GPS ermittelt. Deshalb ist es möglich, die Elemente der äußeren Orientierung automatisch während des Fluges zu erfassen. Dabei verbleiben Restfehler. Ungenauigkeiten von GPS-Messungen und Kalibrierung der Kamera sind nicht auszuschließen. Eine Aerotriangulation (AT) erhöht aber die Chance, Restfehler in der äußeren Orientierung zu vermeiden (ARNOLD, 2013: 20; KRAUS, 2004: 306 ff.). In diesem Verfahren werden breit überlappende Bilder über Verknüpfungspunkte als Bildverband zueinander in Beziehung gesetzt. Somit können weite Räume überbrückt werden, in denen keine terrestrisch eingemessenen Festpunkte oder Passpunkte vorhanden sind. Die Optimierung der absoluten Anbindung kann durch Passpunkte, deren Koordinaten eindeutig bekannt sind, erfolgen (ARNOLD, 2013: 20).

Der aus der AT gewonnene Bildverband dient im Weiteren der Generierung des Oberflächenmodells. Zur Modellierung der Oberflächen stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. So kann die Abbildung der Oberfläche mit Vektoren, aus LiDAR/SAR/InSAR-Daten, mittels Punktzuordnungsverfahren oder Bildzuordnungsverfahren erfolgen (WIEDEMANN, 2010: 3). Das in dieser Arbeit verwendet DOM wurde mit dem Semi-Global Matching (SGM) (HIRSCHMÜLLER, 2005) erzeugt, dem ein pixelbasierter Algorithmus zu Grunde liegt. Dieses Verfahren befindet sich fortlaufend in der Weiterentwicklung (HIRSCHMÜLLER & BUCHER, 2010; HIRSCHMÜLLER, 2010) und verfolgt im Kern die Methodik des Bildzuordnungsverfahrens zum Auffinden korrespondierender Bildpunkte, nach denen entlang einer rekonstruierten Epipolarlinie gesucht werden kann. Die Abhängigkeit der korrespondierenden Bildpunkte zu den realen Objektbodenpunkten in zueinander orientierten Luftbildern wird durch die Epipolargeometrie

beschrieben (SCHREER, 2005). Die Epipolargeometrie stellt geometrische Beziehungen zwischen verschiedenen Kamerabildern des gleichen Objektes her. Die Bildzuordnung erfolgt mittels einer globalen Kostenfunktion die eine sehr hohe Kantenschärfe und die Abbildung feiner Details im DOM ermöglicht. Die Bildelemente werden paarweise den jeweils korrespondierenden, überlappenden Bildelementen aus dem panchromatischen Kanal zugeordnet. Die Bildzuordnung erfolgt dabei von einem Bild aus mit dem jeweils vorherigen und nächsten Bild in Flugrichtung. Mit dem Aufziehen homologer Strahlen durch das jeweilige Projektionszentrum der Luftbilder kann im Schnittpunkt der Strahlen der Objektpunkt mit den Koordinaten x , y und z bestimmt werden. Die so berechneten Höheninformationen (z -Werte), werden in einem georeferenzierten Raster als Grauwerte gespeichert. Das SGM liefert nominelle Oberflächenmodelle in der geometrischen Auflösung, die der Bodenauflösung entspricht. Dies ermöglicht die Darstellung von Kanten und feinen Strukturen. Jedoch können auch hier kleine Strukturen und bewegliche Objekte verschwinden. Obwohl letzteres der Objektivität der Momentaufnahme widerspricht (WIEDEMANN, 2010: 4), kann dieser Effekt je nach Anwendung des Produktes als wünschenswert empfunden werden.

Da die Luftbildaufnahmen in zentralperspektivischer Projektion vorliegen, kommt es zu geometrischen Verzerrungen der Objekte an den Bildrändern. In Folge dessen lassen sich im Bild keine realistischen Distanzen messen, da kein einheitlicher Maßstab vorhanden ist. Die Abb. 3.2 veranschaulicht das. Aus perspektivischer Sicht (Abb. 3.2, rechts) sind die Gebäudefassaden zu erkennen (Verkippung), da die Perspektive stets an den Ort des Betrachters gebunden ist. Es entsteht ein dreidimensionaler Eindruck der Objekte. Die orthographische Ansicht (Abb. 3.2, links) hingegen stellt die Gebäude unabhängig von der Perspektive des Betrachters dar. Sie dient dazu, zweidimensionale Abbildungen (Draufsicht) von dreidimensionalen Körpern herzustellen.

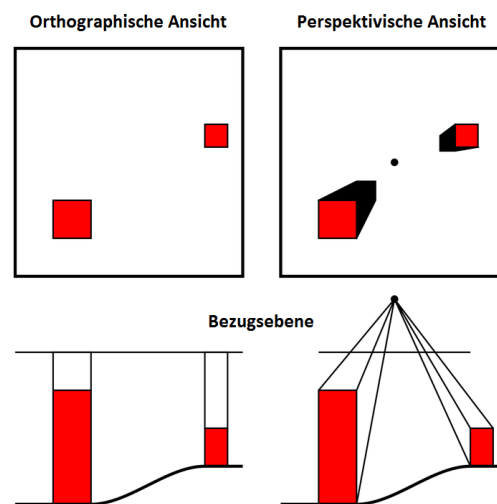


Abb. 3.2 Beispiel einer Verkippung in der zentralperspektivischen Projektion einer Flächenkamera (rechts) und der orthographischen Projektion (links). Entnommen aus Wikipedia (2015a, Orthophoto).

Die Erzeugung eines True Orthophotos, in dem alle Objekte lagerichtig, also ohne lateralen Versatz abgebildet sind, ist eine Grundvoraussetzung, um Objekte wie Gebäude mittels fernerkundlicher Methoden in dicht bebauten Arealen genau vermessen und analysieren zu können. Das bedeutet, jeder im Bild sichtbare Objektteil muss im verwendeten digitalen Oberflächenmodell repräsentiert sein. Bei der Modellierung von Gebäuden ist dies in begrenztem Umfang realisierbar, zieht aber einen beträchtlichen, zusätzlichen Aufwand nach sich. Eine ausreichend detaillierte Modellierung der Vegetation hingegen ist nahezu unmöglich. Die

lagerichtige Abbildung scheitert ebenfalls bei Objekten, die kleiner als die Bildauflösung sind, jedoch im Bild selbst noch sichtbar sein können (z.B. Leitungen, stark reflektierende Spots zum Zeitpunkt der Aufnahme u.a.) (WIEDEMANN, 2010: 1). Die Qualität eines True Orthophotos ist also stark abhängig von der Qualität der Modellierung des ihm zugrunde liegenden Oberflächenmodells.

Orthophotos werden anders als True Orthophotos auf der Grundlage eines digitalen Geländemodells generiert, welches die auf der Erdoberfläche befindlichen Objekte wie z.B. Bebauung oder Vegetation nicht abdeckt. Das digitale Geländemodell ist daher nicht in der Lage schnelle bzw. sprunghafte Höhenvariationen (z. B. Gebäudekanten von Hochhäusern) korrekt darzustellen. Lediglich Objekte, die sich auf demselben Höhengniveau des Geländes befinden, können richtig abgebildet werden (NIELSEN, 2004: 9). Ein Orthophoto ist also eine verzerrungsfreie und maßstabsgetreue Abbildung der Erdoberfläche, jedoch nicht der sich auf ihr befindlichen Objekte. Daher kann es insbesondere in urbanen Gebieten mit vielen erhöhten Objekten dazu führen, dass diese einen radialen Versatz aufweisen und sichttote Räume (durch Objekte verdeckte Bodenpixel), entstehen können.



Abb. 3.3 Orthophoto vs. True Orthophoto.

Links: Orthophoto (Quelle: Google Maps), rechts True Orthophoto (Quelle: DLR).

Die Abb. 3. 3 zeigt im linken Bild ein Orthophoto aus Google Earth. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Fassade teilweise sichtbar ist (Verkippung)). Auch entstehen durch den Versatz sichttote Räume. Messungen zur Bestimmung von tatsächlichen Gebäudemaßen sind nur eingeschränkt möglich und liefern keine lagegenauen Informationen. Das rechte Bild hingegen zeigt ein True Orthophoto desselben Gebietes. Die erhöhten Gebäudestrukturen weisen keinen lateralen Versatz mehr auf. Verdeckte Flächen sind nahezu eliminiert. Erst mit diesem Produkt sind genaue Analysen und Vermessungen der auf der Erdoberfläche befindlichen Objekte möglich.

Ein True Orthophoto ist also nach DIN 18740-3 ein Orthophoto, in dem diese sichttoten Räume, unter Verwendung eines digitalen Oberflächenmodells, weitgehend beseitigt sind. Mit einer stark überlappenden Befliegung kann man diese Forderung am ehesten erfüllen. Im Schnitt werden bei 80% Längs- und 60% Querüberdeckung nur die zentralen 8% des Bildmaterials für die Erstellung der Orthophotos verwendet. Bei der Mosaikbildung sind einzelne Bildpixel in der Regel mit ihren Nachbarn korreliert, was zum Beispiel durch *Pan-Sharpening* hervorgerufen wird. Dies kann an Grenzen zwischen den Bildbereichen zu Farbsäumen führen. Radiometrische und geometrische Restfehler erzeugen weitere Beeinträchtigungen der Ergebnisse (WIEDEMANN, 2010: 5).

Restfehler bei der Mosaikbildung sind in der folgenden Abb. 3.4 zu beobachten, welche einen diagonal über das Bild verlaufenden räumlichen Versatz zeigt.



Abb. 3.4 Restfehler bei der Mosaikbildung, adaptiert nach WIEDEMANN (2015: 5).

Damit die Bilddaten nun in einem Geoinformationssystem (GIS) genutzt werden können, muss eine Differenzialentzerrung unter Verwendung eines DOM durchgeführt werden. Das daraus resultierende Ergebnis ist ein True Orthophoto mit einer pixelgenauen, geometrisch exakten Lage. Gebäudeverkippungen sind nicht mehr im Bild zu sehen. Die True Ortho-Bildgenerierung und die sich daran anschließende Mosaikierung zu einem TOM erfolgt Bild für Bild. Im Endergebnis erhält man ein Mosaik aus in sich konsistenten, scharfen Einzelbildern, in dem die Lage der Objekte korrekt und kantenscharf abgebildet wird. Jedoch können weiterhin in interpolierten Schattenbereichen Höhenverfälschungen zustande kommen. Winkelfehler bei der Bestimmung der Flugbahn und Rauschen in den Daten können ebenfalls Ungenauigkeiten im Oberflächenmodell hervorrufen.

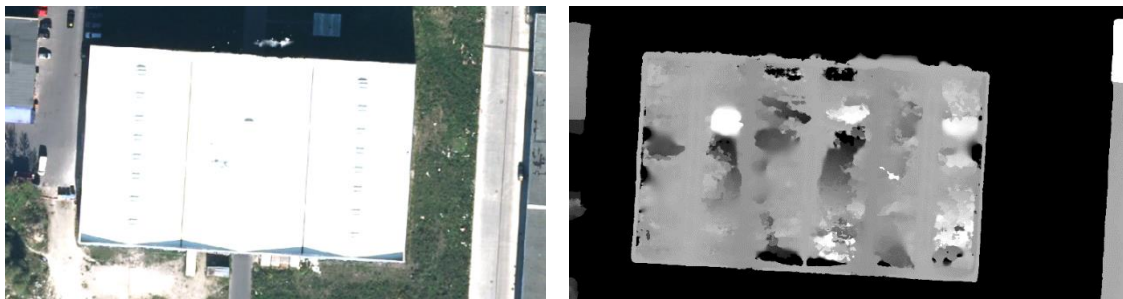


Abb. 3.5 Links das Gebäude in der RGB-Ansicht, rechts das höhenverfälschte nDOM.

Anhand der Abb. 3. 5 sind diese Höhenfehler im Oberflächenmodell (rechts) sehr gut zu sehen. Die messbare Höhe des Gebäudes schwankt zwischen 0 und 21 Metern. In der linken Abbildung ist eindeutig zu erkennen, dass diese Höhenwerte nicht korrekt sein können.

3.5 Ableitung zusätzlicher Datenprodukte und Eigenschaften der Daten

Im Folgenden werden die Datenprodukte auf ihre Eigenschaften hin betrachtet. Außerdem wird beschrieben, welche weiteren für die OBIA notwendigen Produkte aus dem TOM und nDOM abgeleitet werden. Als Bezugssystem sind die Daten auf den weltweiten Standard, UTM-Koordinatensystem (*Universal Transverse Mercator*) in der Zone 33N mit dem geodätischen Bezugssystem ETRS89 (das *Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989*) transformiert. Da Schattenflächen einen großen Einfluss auf die Erstellung des Oberflächenmodells haben und demnach auch auf das daraus abgeleitete TOM, ist grundsätzlich anzumerken, dass aufgrund der frühen Befliegungszeit gegen 8 Uhr morgens und der späten Jahreszeit zwischen dem Spätsommer und dem Frühherbst eine hohe Verschattung im gesamten Datensatz auftritt.

TOM

Der vorliegende Datensatz besteht aus einem Echtfarbenbild in den Kanälen: Rot, Grün und Blau (RGB) und einem nahen Infrarotbild (nIR). Die ursprünglich erzielte Bodenauflösung von 15 cm (x/y) wurde auf eine Auflösung von 30 cm reduziert, was zum einen die Größe des Datensatzes zum anderen aber auch die spektrale und geometrische Heterogenität der zu erfassenden Objekte reduziert (TROSSET et al., 2009). Durch eine hohe radiometrische Auflösung von mehr als 12 Bit und dem simultan generierten DOM sind trotz des hohen Verschattungsgrades viele Objekte in den Schattenbereichen gut identifizierbar. Durch den zusätzlichen nIR-Kanal ist Vegetation aufgrund der hohen spektralen Abstrahlung auch in Schattenflächen noch gut zu erfassen.

Count Maske

Die sogenannte Count Maske ist ein zusätzlich erzeugtes Nebenprodukt aus dem SGM-Prozess zur Generierung eines DOM. In ihr wird die Anzahl der korrespondierenden Punkte während des Bildzuordnungsverfahrens gespeichert. Nicht zugeordnete Bereiche erhalten den Wert Null und ermöglichen somit die Identifikation von *NoData*-Arealen, die im DOM interpoliert werden. So können in Schattenbereichen nur sehr wenige korrespondierende Punkte zur Verfügung stehen, was dazu führt, dass die Höhe aus Nachbarpixeln interpoliert wird und im Zuge dessen, keine genauen Höheninformationen generiert werden können. Der Wertebereich der Count Maske liegt zwischen 0 und 18. Sie kann also während der Klassifizierung dazu genutzt werden, falsche Höheninformationen zu identifizieren und aus der Klassifikation auszuschließen.

nDOM

Das digitale Oberflächenmodell repräsentiert die topographische Struktur der Erdoberfläche samt aller darauf befindlichen Objekte (Gebäude, Vegetation, usw.), indem auf die Objekthöhe die Geländehöhe aufsummiert wird. In einem DOM wird jedem Bildpixel die Höhe über dem definierten Geoid bzw. Ellipsoid mithilfe von in Grauwerten kodierten Höhen zugeordnet. Es liefert absolute Höhen des Geländes über ein Referenzellipsoid der Erde. Im Vergleich zu einem digitalen Geländemodell (DGM) ist es für die Betrachtung von Objektstrukturen auf der Erdoberfläche geeigneter, da nicht nur die natürliche Erdoberfläche erfasst ist.

Um eine automatisierte Extraktion von Objekten und deren tatsächlichen Höhen auf der Erdoberfläche durchführen zu können, müssen absolute Objekthöhen ermittelt werden. Objekte gleicher Höhe können auf verschiedenen Geländehöhen unterschiedlich erfasst werden, wenn z.B. das eine in einer Senke, das andere auf einem Hügel steht. Für die Normierung des Geländes bedarf es also einer Subtraktion des DGM vom DOM. In der Abb. 3. 6 wird links dieses Prinzip schematisch erläutert. In der oberen rechten Abbildung ist das DOM zu sehen, welches Geländeerhebungen in Berlin beinhaltet. Der rote Kreis zeigt den Teufelsberg mit einer Höhe von ca. 120 m über NN (normal null). Die untere rechte Abbildung zeigt das nDOM. Der rote Kreis markiert ebenfalls den Teufelsberg und zeigt, dass die Objekthöhen auf das Gelände normiert wurden.

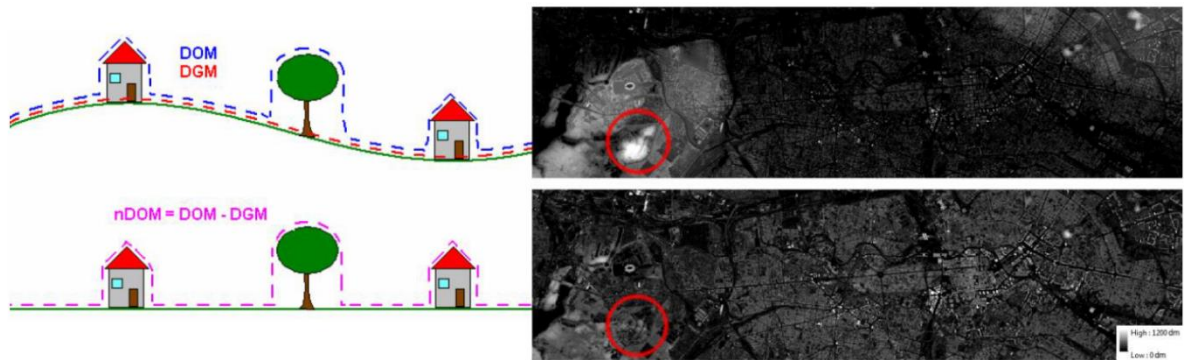
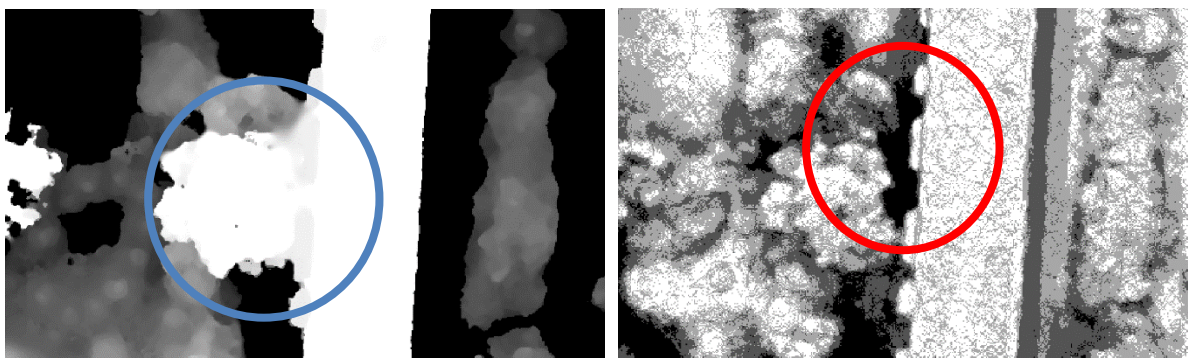


Abb. 3.6 Links, schematische Darstellung der Berechnung des nDOM. Rechts oben, DOM mit rot markiertem Teufelsberg. Rechts unten, berechnetes nDOM mit rot markiertem Teufelsberg (POZNANSKA & BAYER, 2014: 14).

Das Prinzip dieser Methode besteht darin, dass sich erhöhte Objekte im DOM durch einen größeren Höhenwert und abrupte Höhengsprünge von ihrem Umfeld abheben. Mithilfe einer Suchmatrix werden im gesamten Bild erhöhte Pixel im DOM identifiziert. Über einen definierten Höhengschwellenwert werden erhabene Objektpixel bestimmt. Weiterhin werden Punkte identifiziert, die sich am Boden befinden, sogenannte Grundpixel. Ist eine hinreichende Anzahl solcher Punkte identifiziert, werden diese Punkte zu einer Fläche interpoliert, die das DGM bilden. Das somit erzeugte DGM wird mit dem DOM subtrahiert und bildet abschließend das nDOM (ARNOLD, 2013: 22; MAYER, 2004).

Die Stärken des nDOM zeichnen sich durch eine hohe Kantenschärfe aus. Damit ist eine feine und genaue Klassifizierung und Höhenbestimmung von Objekten wie Gebäuden und Dächern möglich. Aufgrund dieser Eigenschaften wird das nDOM (wie in Kapitel Methodik beschrieben) in den Segmentierungsprozess einbezogen, um sowohl die Form der Segmente als auch die Typisierung der Gebäudeobjekte nach Höhenstufen quantitativ erfassen zu können. Schwächen werden vor allem bei interpolierten Bereichen deutlich, wie schon im Abschnitt Count Maske angesprochen. Vereinfacht ausgedrückt, ist die Interpolation in diesem Beispiel eine Methode zur Abschätzung von unbekannten Höhenwerten auf der Basis bekannter Höhenwerte benachbarter Punkte. Schattenbereiche können dazu führen, dass zu wenige dieser Punkte miteinander korrespondieren. Das verursacht Probleme beim Auffinden homologer Punkte, da die Bildinformationen an diesen Stellen kaum vorhanden sind. D.h. die unbekannten Höhenwerte werden geschätzt und können an Gebäudekanten dazu führen, dass diese nicht scharf abgebildet werden oder mit anderen Strukturen wie Bäumen verschwimmen (siehe Abb. 3.7).



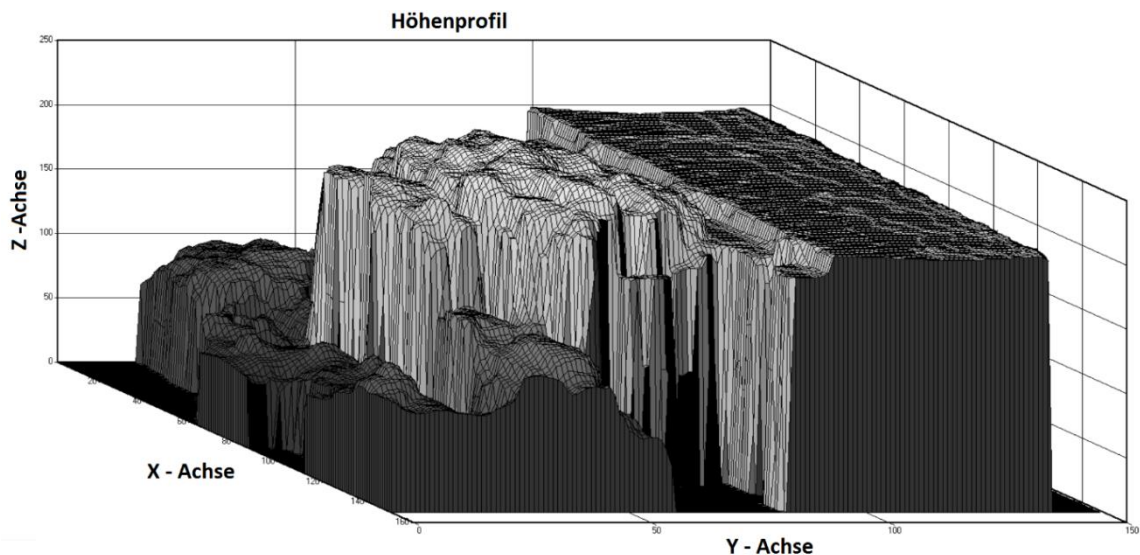


Abb. 3.7 Links oben, Gebäudestruktur mit dicht angrenzendem Baum im nDOM. Rechts oben, Count Maske derselben Szene. Unten, dreidimensionales Höhenprofil des nDOM.

Die Abb. 3. 7 (unten) zeigt eine dreidimensionale Darstellung des nDOM von der oben, links dargestellten Szene. Die Höhe und morphologische Struktur des Baumes lässt ihn wie eine Gebäudestruktur wirken. Aufgrund der starken Schattenflächen, die durch den hohen Bewuchs und das Gebäude entstehen (siehe roter Kreis oben, rechts) ist es nicht möglich, korrespondierende Punkte zu finden. Sie werden in der Count Maske zu *NoData*-Werten zusammengefasst, wie in dem Kreis anhand der schwarzen Fläche zu sehen ist. Da die Segmentierung auf Grundlage des nDOM erfolgt, sind somit Fehler bei der Erstellung der Segmente nicht zu vermeiden. Die Information der Count Maske kann entscheidend dazu beitragen, Flächen mit schlechter Korrespondenz von Punkten zu identifizieren und diese für eine korrekte Klassifikation nutzbar zu machen. Interpolationsfehler im Oberflächenmodell können ebenfalls aufgrund zu starker Sichtschatten an hohen Gebäuden auftreten (siehe Abb. 3.8).

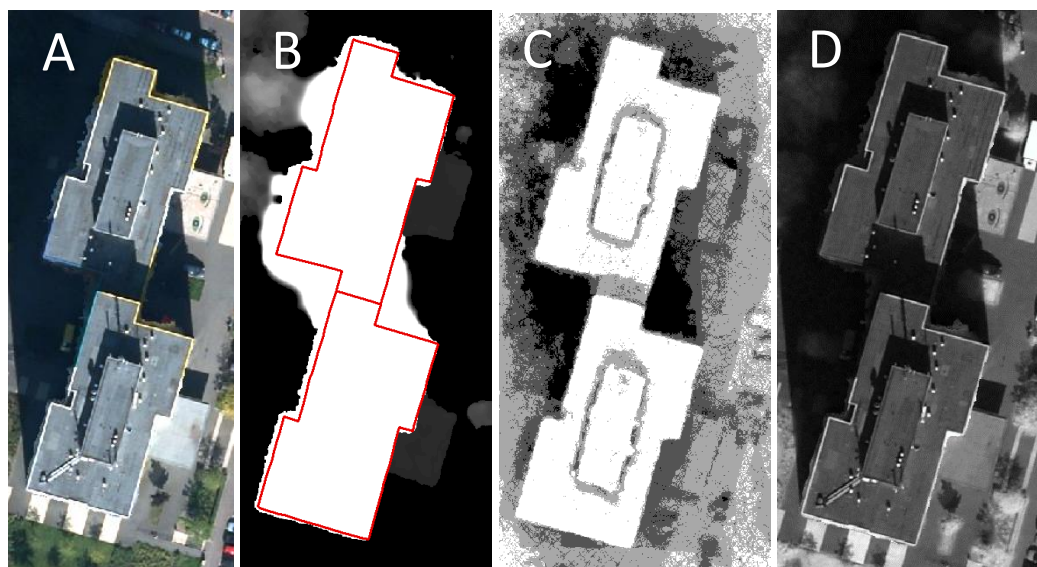


Abb. 3.8 Von links nach rechts: A, Hochhaus mit starken Verschattungen. B, nDOM mit Fehlern in Schattenbereichen. C, Count Maske, je heller desto mehr korrespondierende Punkte sind gespeichert. D, nIR für vegetative Analysen.

Die Abb. 3. 8, A zeigt ein Hochhaus, welches im Bild B Fehler im nDOM aufweist. Der rot eingefärbte Gebäudegrundriss in B demonstriert dies deutlich. In der Abbildung C ist klar zu erkennen, dass die Count Maske eine präzisere Darstellung des Gebäudes liefert. Je dunkler die Fläche desto weniger korrespondierende Punkte konnten für das SGM gefunden werden. Insbesondere die Schattenflächen werden im DOM interpoliert. Daher sind alle *NoData*-Werte in der Count Maske Schätzungen der Höhe. Aufgrund der großen Höhe des Gebäudes entstehen in den Schattenflächen Fehler am Grund. So kann ein Bodenpixel mit einer tatsächlichen Höhe von 0 m im DOM einen sehr viel höheren Wert annehmen. Die Abbildung D zeigt das nIR-Bild, welches im Vergleich zu dem RGB Bild die Schattenflächen im vegetativen Bereich besser darstellt.

Wie im obigen Absatz angesprochen, kann die Festlegung des Höhenschwellwertes auch zu einer fehlerhaften Zuordnung von niedrigen Objekten führen. Die Festlegung eines einheitlichen Höhenschwellwertes ist jedoch in urbanen Bereichen mit großen Gebäudehöhendifferenzen kritisch und muss sich an der Fragestellung des Einsatzes orientieren. Legt man den Schwellwert zu hoch an, werden niedrige Gebäude nicht erfasst. Verändert man den Schwellwert zugunsten von kleineren Gebäuden, können an anderer Stelle unerwünschte Objekte erfasst werden, die keine Gebäude sind. Es ist daher von Vorteil bei der Herleitung des Produktes darauf zu achten, einen Schwellwert zu definieren, der an die jeweilige Fragestellung angepasst ist. So kann es vorkommen dass im Hinblick auf eine Extraktion von Gebäuden zwar kleinere Gebäudestrukturen wie Gartenlauben nicht vollständig erfasst werden, aber im Gegenzug dazu, auch störende Objekte wie parkende Autos oder LKW, die als Gebäude identifiziert werden könnten, eliminiert werden.

Neigungs-Layer

Der Neigungs-Layer (Slope) wird auf Grundlage des nDOM mittels der Software ESRI ArcGIS produziert. Die Neigung berechnet sich aus der maximalen Änderungsrate des Wertes eines Pixels im Vergleich zu seinen benachbarten Pixeln und wird zwischen 0 bis 90 Grad ausgegeben (ESRI RESOURCES, 2013). Durch die Neigung lassen sich Dachschrägen und –aufbauten leicht identifizieren und können somit zusätzliche attributive Eigenschaften im Hinblick auf die Typisierung von Gebäudestrukturen liefern (siehe Abb. 3.9, links).

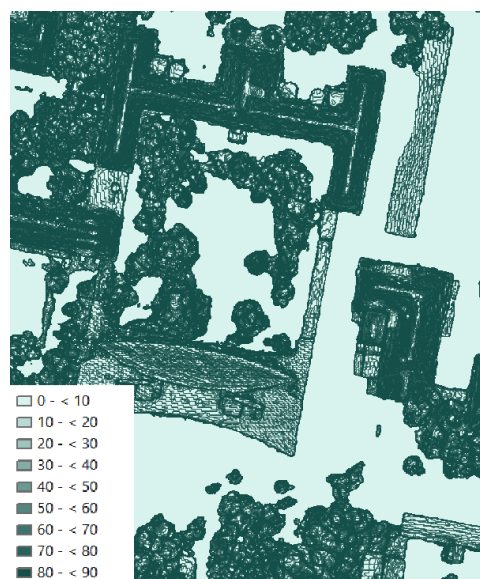


Abb. 3.9 Neigungs-Layer.

3.6 Verwendete Vektordaten

Die Vektordaten beinhalten folgende Layer, die auf das UTM ETRS89 Koordinatensystem transformiert wurden, um mit den Rasterdatensätzen übereinzustimmen:

- Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK), (Stand: 06.2012), mit Gebäude-Layer der bestehenden, geplanten oder im Bau befindlichen Gebäude der Region Berlin
- Umweltatlas der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin, (Stand: 06.2012), mit der Flächennutzung und den Strukturtypen

Als darstellender Bestandteil des Liegenschaftskatasters, ist die automatisierte Liegenschaftskarte (ALK-Berlin) ein flächendeckender, blattschnittfreier Datenbestand, bestehend aus ca. 2,2 Millionen Objekten. Darunter sind 548.000 Gebäude erfasst, bei denen unter anderem die Nutzung, Geschossanzahl und Fläche aufgeführt ist (SENSTADTUM 1, 2015). Die o.g. Anzahl der bis heute erfassten Gebäude ist im Vergleich zum Aufnahmedatum des Luftbildes nicht aktuell. Da die aktuellsten ALK-Daten nicht zur Verfügung standen, musste mit dem Datensatz vom Juni 2012 gearbeitet werden. Die Datengrundlage der UCX stammt aus dem Jahr 2010. Folglich entspricht der Vektordatensatz nicht der Bebauungslage, die mit der UCX-Befliegung 2010 abgebildet wurde. Es musste dennoch ein Weg gefunden werden, mit dem Vektordatensatz eine Genauigkeitsprüfung vornehmen zu können. Deshalb wurde bei der Genauigkeitsüberprüfung eine zeitliche Nähe zwischen der Klassifizierungsgrundlage und den Validierungsdaten postuliert. Der vorliegende ALK-Datensatz stellt die einzige verfügbare Grundlage für die Überprüfung der Genauigkeit der Klassifizierungsergebnisse der großflächigen Untersuchungsgebiete dar.

Der Umweltatlas fasst die Arbeitsergebnisse der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt zusammen. Dabei werden verschiedenste Bereiche, wie Boden, Wasser, Klima, Flächennutzung etc. dargestellt (SENSTADTUM 2, 2015). Insbesondere die Flächennutzung ist für die Fragestellung der Gebäudetypisierung von besonderer Bedeutung. Die Wahl der Untersuchungsgebiete ist maßgeblich von der Abdeckung der unterschiedlichen Wohnnutzungsklassen abhängig. Der Datensatz liefert also die Grundlage für die Auswahl der für die OBIA bearbeiteten Flächen in Berlin. Das folgende Kapitel beschreibt diese Selektion explizit.

Zusätzlich zu den genannten Datensätzen wurde ein Vektordatensatz des Eisenbahnverkehrsnetzes von Berlin aus der frei zugänglichen Datenbank von OpenStreetMap (OSM) verwendet, um fehlerhaft klassifizierte Geometrien zu löschen. Die damit erzielbare Genauigkeit wird in Kapitel 6.4 und die Anwendung in Kapitel 5 Methodik, thematisiert.

3.7 Kriterien zur Auswahl der Untersuchungsgebiete und deren Charakteristika

Die Auswahl der Untersuchungsgebiete erfolgte anhand der differenzierten Flächentypen des Berliner Umweltatlas. In der Karte 06.08 des Umweltatlas werden diese differenzierten Flächentypen anhand ihrer typischen Nutzung, Entstehungszeit und Bau- und Freiflächenstruktur dargestellt. Insgesamt sind 62 verschiedene Flächentypen abgegrenzt (HANSCHKE & BEDDING, 1995/2005: 6). Von diesen sind 22 Flächentypen mit überwiegender Wohnnutzung. Davon werden für die Wahl der Untersuchungsgebiete 11 Klassen mit Wohnnutzung, 4 mit Mischnutzung, 2 mit gewerblicher und industrieller Nutzung sowie eine Klasse der Wochenendhäuser und kleingartenähnliche Nutzungen betrachtet. Diese Klassen sind für die Attraktivität von Wohnstandorten aussagekräftig, da sie einen Großteil der typischen Wohnnutzung in Berlin abdecken und fernerkundlich erfassbar sind. Flächentypen wie Kleingartenanlagen, Siedlungen der 90er Jahre (Reihen-Einzel-Doppelhäuser) oder offene

Siedlungsbebauung wurden nicht betrachtet. Flächen wie Parkplätze oder der Typ Kultur wären zwar im Hinblick auf Attraktivitätsindizes für eine mögliche Wohnstandortwahl interessant gewesen, sind aber im Rahmen dieses Projektes fernerkundlich nicht zu erheben. Die in der Mischnutzung enthalten Klassen haben alle einen Bezug zu Wohnflächen. Die beiden gewerblich und industriell genutzten Klassen können unter Berücksichtigung der Auswirkung ihrer direkten Nähe zu Wohngebäuden für die Qualität des Wohnstandortes aussagekräftig sein. Ebenfalls sind diese aufgrund ihrer spezifischen Morphologie wie der Form, Größe und Höhe zum Teil fernerkundlich ableitbar.

Von den 16 Stadtstrukturtypen die im Datensatz der Umweltatlas zur Verfügung standen wurden 12 verwendet, die mit den Flächennutzungen verknüpft sind. Sie sind im Folgenden aufgelistet:

- Blockbebauung der Gründerzeit mit Seitenflügeln und Hinterhäusern
- Blockrandbebauung der Gründerzeit mit geringem Anteil von Seiten- und Hintergebäuden
- Blockrandbebauung der Gründerzeit mit massiven Veränderungen
- Blockrand- und Zeilenbebauung der 20er und 30er Jahre
- Zeilenbebauung seit den 50er Jahren
- hohe Bebauung der Nachkriegszeit
- Siedlungsbebauung der 90er Jahre
- niedrige Bebauung mit Hausgärten
- Villenbebauung mit parkartigen Gärten
- Bebauung mit Gärten und halbprivater Umgrünung
- geringe Bebauung mit überwiegender Nutzung durch Gewerbe und Industrie
- dichte Bebauung mit überwiegender Nutzung durch Gewerbe und Industrie

Bis auf die Typen: (a) dörfliche Bebauung, (b) Bebauung mit überwiegender Nutzung durch Handel und Dienstleistung, (c) Bebauung mit überwiegender Nutzung durch Gemeinbedarf und Sondernutzung, Verkehrsflächen ohne Straßenland oder Baustellen, (d) nicht oder gering bebaute Flächen der Gemeinbedarfs- und Sondernutzungen sowie Grün und Freiflächen wurden alle Typen in den beiden Untersuchungsgebieten abgedeckt. Die dörfliche Bebauung ist aufgrund der Fragestellung der urbanen Ableitung von Gebäudetypen und deren Wohnstandortqualitäten nicht relevant. Die anderen genannten Klassen haben mit Wohnnutzen nichts zu tun und werden daher nicht betrachtet.

Die Flächentypen sind auf Grundlage des Berliner Informationssystems Stadt und Umwelt (ISU) dargestellt. Diese Bezugsflächen entsprechen statistischen Blöcken. Bei unterschiedlicher Nutzung innerhalb eines Blocks werden diese zu nutzungshomogenen Blockteilflächen weiter unterteilt (HANSCHKE, 1995; BEDDING, 2005: 6). Flächentypen mit überwiegender Wohnnutzung (Freiraumtypen) kommen nur auf Blöcken oder Blockteilflächen vor. Sie werden anhand ihrer typischen Bau- und Freiraumstruktur sowie ihrer Entstehungszeit differenziert und weisen somit ein charakteristisches, räumliches Erscheinungsbild auf (HANSCHKE, 1995; BEDDING, 2005: 5). Die Flächentypen mit Wohnnutzung nehmen mehr als die Hälfte der baulich genutzten Fläche und mehr als ein Viertel der genutzten Gesamtfläche Berlins ein. Des Weiteren wird ein breites Spektrum von Gebieten mit Einfamilienwohnhäusern bis hin zur Großsiedlung abgedeckt (SENSTADTUM, 2011: 1).

Die Differenzierung des Flächennutzens erfolgt durch die Flächentypen. Diese sind durch ihre verschiedenen städtebaulichen oder umweltbezogenen Indikatoren und Kenngrößen in hohem Maße von der Stadtstruktur abhängig. Das Baualter, die Höhe, die Dichte und Anordnung der

Gebäude zueinander und die Freiraumstruktur sind hierbei von besonderer Bedeutung. Die Kenntnis dieser unterschiedlichen Strukturtypen bildet die Grundlage für städtebauliche Untersuchungen. Da jedoch im Umweltatlas nicht alle Daten vorliegen oder mit vertretbarem Aufwand erhoben werden können, werden durch Stichprobenkartierung, Literaturwerte oder durch gutachterliche Abschätzung Kennwerte oder Indikatoren zugeordnet. Diese werden dann über die flächendeckend vorliegende Kartierung von Nutzung und Stadtstruktur, mit hinreichender Genauigkeit für viele Anwendungsfälle auf die gesamte Stadt übertragen (SENSTADTUM, 2011: 1).

Da für eine fernerkundliche Extraktion von Gebäudetypen die hinreichende Genauigkeit der Höhe der Gebäude und des Baualters nicht ausreichend ist, ist der Datensatz nur als Auswahlwerkzeug für Testareale mit einer möglichst umfassenden Abdeckung aller relevanten Gebäudetypen im Berliner Stadtgebiet verwendet worden. Auch die Aggregation auf Blockebene ist zu grob und ungenau für die aus den Luftbilddaten extrahierbaren Gebäudetypologien. Das folgende Beispiel verdeutlicht dies.



Abb. 3.10 Ergebnisse der OBIA und Flächennutzung aus dem Umweltatlas (gelbe Umrandung), links und das dazugehörige Luftbild rechts, (Quelle: Google Earth).

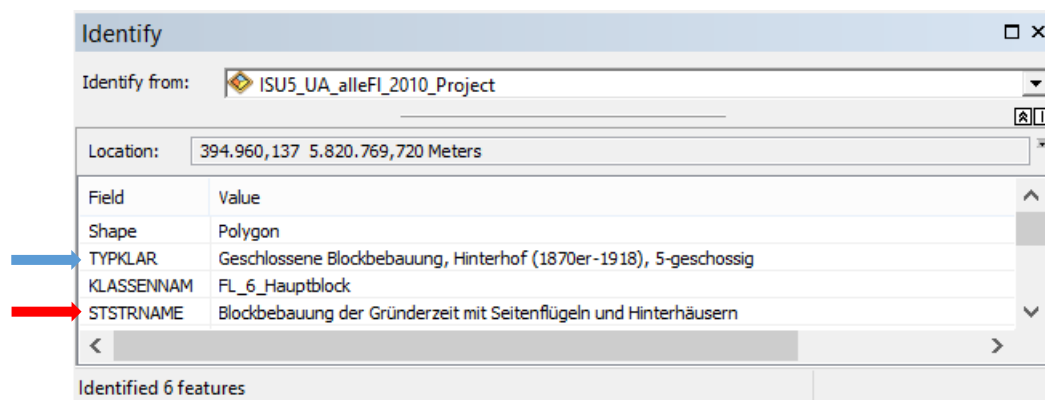


Abb. 3.11 Auszug aus den Attributdaten des Umweltatlas für den Flächen- und Strukturtyp aus Abb. 3.1.

Für eine Validierung der Genauigkeit bzw. eine Vergleichbarkeit der in der OBIA extrahiert Gebäudetypen und denen in der ISU erfassten differenzierten Flächentypen kann der Datensatz nicht hinzugezogen werden. Die Abb. 3.10 (links) zeigt, dass der Block in der OBIA als Klasse „Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen“ (gelb eingefärbt) und „Spitzdach zwischen 3 bis 5 Etagen“ (rot eingefärbt) identifiziert wird. Die Gelb umrandeten Flächen stellen die Flächentypen aus dem Umweltatlas dar. Das rechte Bild zeigt das dazugehörige Luftbild. Im Umweltatlas (Abb.3.11) wird der Block hingegen als Strukturtyp „Blockbebauung der Gründerzeit mit Seitenflügeln und Hinterhäusern“ geführt (roter Pfeil). Bezüglich seines Flächentyps wird der Block als „Geschlossene Blockbebauung, Hinterhof (1870er-1918)“ sowie 5-geschossig geführt (blauer Pfeil). Die Zuordnung der Flächen- und Strukturtypen erscheint für einen Großteil der Fläche prinzipiell richtig. Jedoch wird das in Abb. 3.10 (links) am oberen Rand klassifizierte Gebäude (gelb) der Klasse „Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen“ im Umweltatlas als 5-geschossiges Gründerzeithaus geführt. Für die Arbeit werden daher im Folgenden die Flächentypen sowie die damit verbundenen Strukturtypen lediglich für die Auswahl der Untersuchungsgebiete verwendet.

Zwei Untersuchungsgebiete wurden ausgewählt. Die Abb. 3.12 zeigt die 18 Flächentypen, die die Grundlage der Auswahl bilden. Weiterhin ist deren Häufigkeit in dieser Abbildung dargestellt.

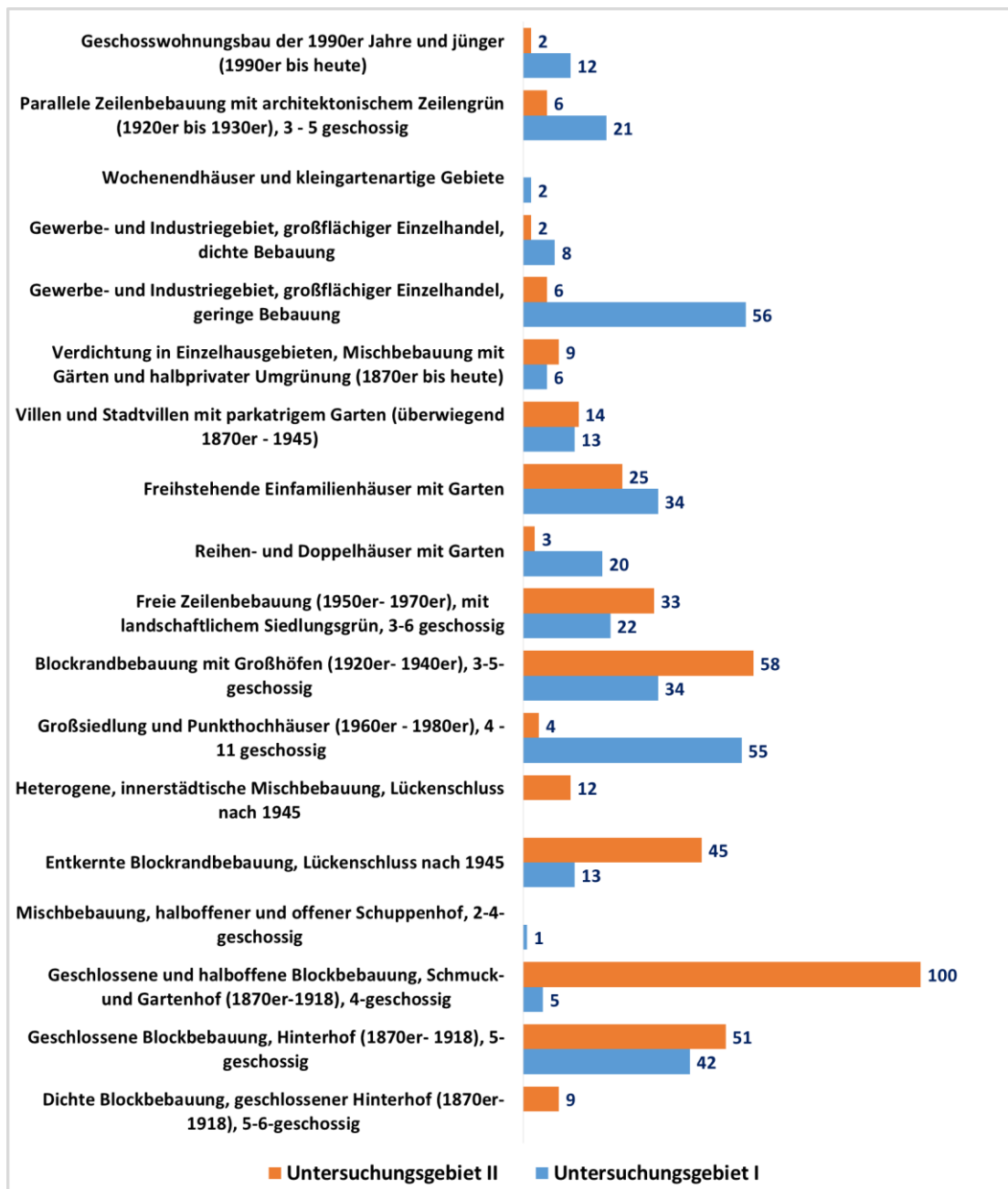


Abb. 3.12 Verteilung der Flächennutzung der jeweiligen Untersuchungsgebiete (Quelle: Umweltatlas).

Einige Flächentypen werden dabei nur in geringer Anzahl abgedeckt, wie z.B. Wochenendhäuser, oder Mischbebauung, halboffener und offener Schuppenhof, 2 bis 4 geschossig. Eine Ausdehnung des Untersuchungsgebietes zur Erhöhung der Anzahl dieser Flächentypen hätte die teilweise iterativ angewandten Prozesse, die für die Erstellung der OBIA und Typisierung von Gebäuden und anderen Objekten notwendig waren stark beeinträchtigt. Dies ist zum einen darin begründet, dass der Überblick über die richtig und falsch klassifizierten Objekte verloren geht und Veränderungen der Klassifikation bei Umstellungen in den Extraktionsabläufen nicht sofort bemerkt werden. Zum anderen an der zur Verfügung stehenden Rechenleistung für die Segmentierung der Bilddaten, die bei einer hohen Auflösung und den verwendeten Segmentierungsparametern schnell an ihre Grenzen stoßen würde. Daher bietet es sich an große Gebiete in Teilgebiete zu untergliedern, um die optimalen Kapazitäten für eine Bildanalyse zu nutzen. Exemplarisch sind alle relevanten Nutzungstypen abgedeckt. Somit konnten probate Untersuchungsgebiete die den Großteil der in

Berlin vorhandenen Wohngebäude, bzw. die im Hinblick auf die Attraktivität des Wohnstandortes beeinflussenden Strukturen wie Gewerbe- und Industriegebiete gebildet werden.

Für eine mögliche Weiterverarbeitung im Wohnstandortmodell wurden die Untersuchungsareale in die Teilverkehrszellen (TVz) verschnitten. Dies bietet sich an, da Zusammenhänge zwischen intermodalen Mobilitätsverhalten, Mobilitätskonzepten und die Identifikation von Einflussfaktoren für die Wohnstandortwahl im Teilprojekt der Arbeitsgruppe Modellierung urbaner Mobilität der Abteilung Mobilität und Urbane Entwicklung am Institut für Verkehrsforschung des DLR untersucht werden sollen. Diese Teilverkehrszellen wurden 2006 zwischen den planenden Fachverwaltungen des Senats, den Bezirken und dem Amt für Statistik Berlin-Brandenburg neu zugeschnitten, um eine Schnittfreiheit mit Statistischen Gebieten (StG) und den Lebensweltlich Orientierten Räumen (LOR) zu erzielen. Die Verkehrsbereiche gliedern sich in drei Ebenen, wobei die TVz mit 1.223 Teilverkehrszellen die feinstrukturierteste bildet und somit für statistische Analysen in Bezug auf Attraktivität von Wohnstandorten geeignet ist (SENSTADTUM, 2013: 1).

Gebietsmerkmale

Das Untersuchungsgebiet I erstreckt sich über weite Bereiche von Berlin-Ost. Es deckt dabei Teile des innerstädtischen Berliner S-Bahnringes, sowie große Teile von Nord-Ost-Berlin ab und beinhaltet partiell die Stadtbezirke Lichtenberg, Friedrichshain-Kreuzberg und Pankow. Dieses Gebiet verfügt über einen hohen Anteil an repräsentativen Gebäudeflächen mit unterschiedlichsten Bauhöhen, von Einfamilienwohnhäusern, über Altbaustrukturen bis hin zu Hochhäusern und großen gewerblich und industriell genutzten Komplexen. Neben der typischen Berliner Wohnbebauung, mit 5-geschossigen Altbauten (1870 - 1918), ihren charakteristischen Dachformen und der Höhe von 22 m (Traufhöhe), sind auch die Plattenbauserien der DDR vertreten. Diese haben aufgrund ihrer Eigenschaften einen besonderen Stellenwert, da sie nur im östlichen Teil der Stadt vorkommen und somit ein architektonisch abweichendes Stadtbild im Vergleich zum westlichen Teil der Stadt bieten.

Das Untersuchungsgebiet II beinhaltet ein Teilgebiet von Berlin-West. Es deckt Teile von Steglitz-Zehlendorf, Charlottenburg-Wilmersdorf, Tempelhof-Schöneberg ab. Das zweite Gebiet ist besonders durch sein hohes Vorkommen an Altbauten (1870 – 1918) mit 4 Geschossen bei einer Traufhöhe von 22 m gekennzeichnet. Daraus ergeben sich prinzipiell andere Geschosshöhen als in 5 geschossigen Altbauten. Gleichzeitig zeichnet sich das Gebiet durch eine große Anzahl von Ein- und Mehrfamilienwohnhäusern, Villen und eine höhere Bebauungsdichte aus. Hochhäuser sind hingegen selten vertreten. Weiterhin gibt es architektonische Unterschiede der Gebäude, die in der Nachkriegszeit in Berlin-West und -Ost entstanden. Daher ist die Auswahl beider Gebiete zur Untersuchung der Fragestellung in der Arbeit sinnvoll.

Die identifizierten Untersuchungsgebiete sind in Abb. 3.13 zu sehen.

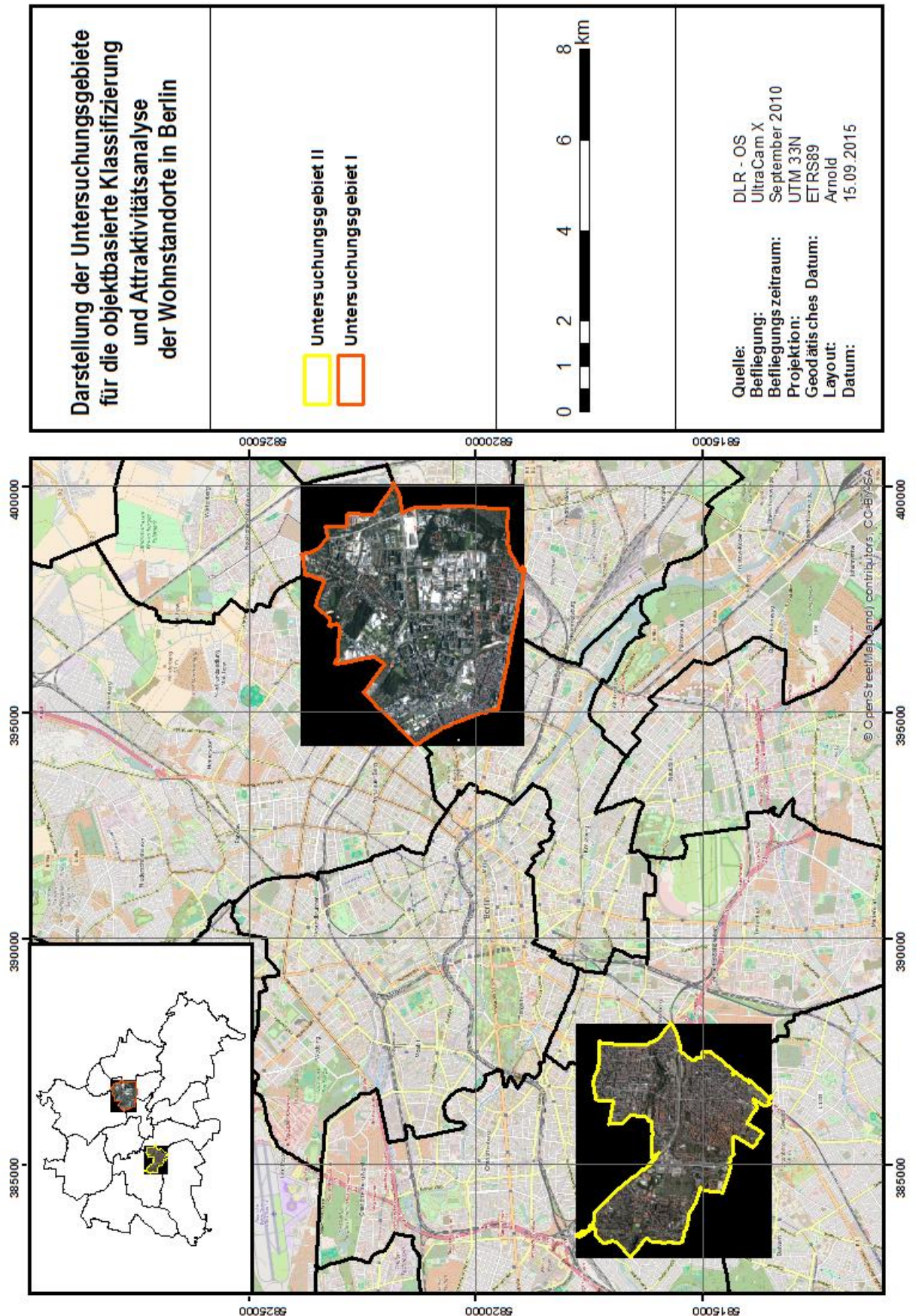


Abb. 3.13 Darstellung der Untersuchungsgebiete.

4 Methoden der Bildanalyse

Die Bildanalyse ist ein komplexes Verfahren welches aus mehreren Teilen besteht. Es geht darum, sinnvolle Informationen aus Bildern zu extrahieren. Dies kann beispielsweise die Trennung eines Objektes vom Hintergrund sein. Sie unterteilt sich in Szene, Bildaufnahme, Bildvorverarbeitung, Segmentierung, Merkmalsextraktion, Klassifizierung und Aussage. Das reale beobachtete Objekt wird in der Szene dargestellt. Die Bildaufnahme erfolgt mittels geeigneter Sensoren (z.B. Radar, Fotografie). Die Bildvorverarbeitung verfolgt das Ziel, eine bereits digitalisierte Bildvorlage zu bearbeiten, um darin enthaltene Informationen für den menschlichen Betrachter besser sichtbar zu machen (Bildverbesserung). Weiterhin können Informationen für nachfolgenden Verarbeitungsstufen der rechnergestützten Mustererkennung (Merkmalsextraktion und Klassifikation) aufbereitet werden (KLAUS et al., 2015: 5). Die Segmentierung beschreibt die Zusammenfassung von Pixeln nach entsprechenden Homogenitätskriterien und deren Zuordnung zu Segmenten. Die Merkmalsextraktion quantifiziert den visuellen Bildeindruck. Sie verfolgt das Ziel die wesentlichen Informationen aus den zur Verfügung stehenden Rohdaten zu gewinnen. D.h. für die zur Verfügung stehenden Segmente werden bestimmte Eigenschaften wie beispielsweise deren Flächeninhalt, Umfang, Schwerpunkt oder Kompaktheit festgelegt. Mithilfe dieser Eigenschaften und einem Regelwerk werden die Segmente in verschiedene Klassen unterteilt. In der Klassifizierung wird eine Zuordnung zwischen den Bildbereichen und Objekten in der realen Welt hergestellt. Die Auslegung dieser Ergebnisse führt dann schließlich zu der Aussage was in dem Bild an Informationen enthalten ist (MARTENS, 2000: 39ff). Während die in der Arbeit eingesetzten Verfahren zur Bildaufnahme und Bildvorverarbeitung bereits in Kapitel 3 beschrieben wurden, werden im Folgenden die Segmentierung und Klassifizierung beschrieben.

4.1 Segmentierung

Die Bildsegmentierung ist ein Teilgebiet der digitalen Bildverarbeitung und im Prozess des maschinellen Sehens der erste Schritt der Bildanalyse. Sie beschäftigt sich mit der Unterteilung eines Bildes in verschiedene Regionen, wobei wiederum jede Region davon bestimmte Merkmale besitzt. Die Bildelemente eines segmentierten Bildes sind keine Pixel mehr, sondern eine koalierende Menge von Pixeln, die derselben Region angehören. Somit kann jede Region analysiert werden und zudem die Beziehung zu benachbarten Regionen festgelegt werden. Die Segmentierung eines Bildes ist also für die quantitative Auswertung der Bilddaten von wesentlicher Bedeutung (SOILLE, 1998: 7). Sie stellt einen Übergang dar, zwischen einer rein numerischen Darstellung des Bildes zu einer symbolischen. Es werden nur einfache Objekte wie Punkte, Linien und Flächen ermittelt. Diesen wird jedoch noch keine Klasse mit attributiven Eigenschaften zugeordnet. Für die Segmentierung werden nur wenige Informationen verwendet. Diese können Merkmale über den Grauwert, die Form, die Größe oder die Lage des Objektes im Bild enthalten. Denn das eigentliche Ziel ist die Zerlegung des Bildes in Teilbereiche (Segmente) mit gleichen Eigenschaften. Die Segmentierung kann also als Generierung von inhaltlich zusammenhängenden Regionen durch Zusammenfassung benachbarter Pixel entsprechend bestimmter Homogenitätskriterien verstanden werden. Heterogene Pixelinformationen werden zu homogenen Objekten verschmolzen. So werden für die jeweilige Fragestellung relevante Objekte extrahiert, die leichter weiter zu verarbeiten sind. Durch diese Objekttrennung erfolgt eine erste Bildzuweisung zu einzelnen Regionen im Bild. Die Segmentierung stellt also ein Verfahren zur Mustererkennung und Bildinterpretation dar (STEINBRECHER, 2005: 203).

Da die Segmentierung die Basis der sich anschließenden Klassifizierung bildet, ist die Qualität dieser entscheidend. So sind nicht nur spektrale Informationen für die Klassenbeschreibung von Bedeutung. Vielmehr kann auch die Formeigenschaft und Größe der gebildeten Segmente über die anschließende Güte der Klassifizierung entscheidend sein. „Je genauer die resultierenden Segmente deren reale Objektform widerspiegeln, umso einfacher und genauer die anschließende Klassifizierung“ (BAATZ & SCHÄPE, 2000; POZNANSKA & BAYER, 2014: 34).

Das Ziel der Segmentierung ist nach BAATZ & SCHÄPE (2000) und ANDRESEN (2004: 43) wie folgt definiert:

- Hohe Qualität: Für eine optimale Trennung und Repräsentation von Bildregionen müssen die Segmente homogen sein.
- Segmentierung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen
- Vergleichbarkeit der Auflösung: Nur Objekte ähnlicher Auflösungen sind vergleichbar.
- Hierarchische Objektstruktur
- Trennbarkeit von Bildbereichen
- Nutzung beliebig dimensionaler Daten
- Reproduzierbarkeit
- Allgemeingültigkeit: Anpassbarkeit auf beliebige Daten und Fragestellungen
- Geschwindigkeit

Man unterscheidet die Segmentierung ergebnisorientiert nach der Vollständigkeit der Zuordnung von Pixeln zu den Segmenten. So bezeichnet eine zusammenhängende Segmentierung, den Zustand, in dem jedes Segment ein zusammenhängendes Gebiet bildet. Bei einer überdeckungsfreien und vollständigen Segmentierung ist jedes Pixel genau einem Element zugeordnet.

Bildsegmentierungsverfahren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen, wissensbasierte (*top-down*) sowie datengetriebene (*bottom-up*) Verfahren. Die wissensbasierten Ansätze oder auch modellgetriebene Verfahren genannt, setzen voraus, dass der Benutzer die zu extrahierenden Objekte kennt und auf dieser Grundlage ein Modell für diese entwickelt. Das Modell wird üblicherweise durch eine Datenbank realisiert. Für die Extraktion der Objekte sucht das System nach den besten Lösungen und Methoden. Nur diejenigen Objekte die zum Modell passen werden segmentiert. Jedes erstellte Segment impliziert eine semantische Bedeutung. Die datengetriebenen Ansätze segmentieren das ganze Bild anhand bestimmter statistischer Methoden und Parameter. Dabei müssen die resultierenden Segmente nicht zwingend den Objekten der realen Welt entsprechen, da diese keine semantische Bedeutung haben. Die Segmente sind Pixelcluster und werden auch als Bildobjektprimitive bezeichnet. Welche Objekte der realen Welt segmentiert werden sollen, wird vom Benutzer entschieden (OCZIPKA, 2007: 63).

Verschiedene Segmentierungsalgorithmen können für eine automatische Unterteilung des Bildes in homogene Abschnitte verwendet werden. Die Anwendung dieser sowie deren Einstellungsmöglichkeiten sind von der Datengrundlage und der Fragestellung abhängig. Eine diskrete Annäherung an die optimalen Einstellungen ist daher notwendig und erfolgt iterativ. Die wichtigsten Verfahren sind (JÄHNE, 2012: 541ff.):

- Pixelorientierte Verfahren
- Kantenorientierte Verfahren
- Regionen-orientierte Verfahren
- Modellbasierte Verfahren

- Texturorientierte Verfahren

Diese Verfahrensweisen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

4.1.1 Pixelorientierte Verfahren

Die pixelorientierte Segmentierung ist von ihrer Funktionsweise das einfachste Segmentierungsverfahren. Hierbei wird für jeden einzelnen Pixel entschieden, zu welchem bestimmten Segment es gehört. Üblicherweise ergeben pixelorientierte Verfahren vollständige und überdeckungsfreie Segmentierungen. Es werden keine Bildpunkte ignoriert oder zusammengefasst betrachtet. Der allgemeinen Methodik liegt das Schwellwertverfahren zugrunde. Der Grauwert eines Pixels wird mit einem Schwellwert, welcher mittels eines Histogramms ermittelt wurde verglichen. In einer Graphik wird dann die Anzahl der Bildpunkte, welche denselben Grauwert haben, dem Histogramm zugeordnet. Der Schwellwert kann über drei mögliche Methoden ermittelt werden. Dem globalen Schwellwert, dem lokalen Schwellwert und dem dynamischen Schwellwert. Das Verfahren bietet den Vorteil, dass es einfach in der Bildanalyse zu implementieren ist und aufgrund dessen sehr schnell ist. Weiterhin wird das Bild vollständig segmentiert. Die Nachteile hingegen sind die Anfälligkeit gegenüber Helligkeitsveränderungen im Bild. Insbesondere bei Farbbildern wird nur ein eindimensionaler Wert benutzt was dazu führt, dass keine weiteren Informationen zur Verfügung stehen und Farbveränderungen auftreten können. Außerdem erfolgt keine zusammenhängende Segmentierung des Bildes, da die Bildpunkte nicht zusammengefasst werden. Das Verfahren ist stark Schwellwert-abhängig (JÄHNE, 2012:542ff.).

4.1.2 Kantenorientierte Verfahren

Hierbei wird nach Kanten und Konturen im Bild gesucht. Das Verfahren geht von der Annahme aus, dass zwischen zwei Objekten eine abrupte Grauwertveränderung vorhanden ist. Bei der Vorgehensweise wird zunächst eine Funktion für das komplette Bild aufgestellt, die die Grauwerte in Abhängigkeit zu der Position der Pixel darstellen. Das Bild wird dann Linie für Linie untersucht und die Extrema des Gradienten der Funktion für die erste Pixel-Linie berechnet. Daraus ist die Position von Kantenpunkten ermittelbar. So werden vorlaufend alle Pixel-Reihen nach Extrema untersucht. Das Ergebnis ist eine Menge von Kantenpunkten. Diese Kantenpunkte werden dann mithilfe eines Kantenverfolgungsalgorithmus (z.B. Hough-Transformation) zu durchgehenden Kanten vervollständigt. Der Vorteil gegenüber pixelorientierten Verfahren ist, dass Bildobjekte auch mit unterschiedlicher Helligkeit zu erkennen sind. Darüber hinaus arbeitet das Verfahren bei uneinheitlichem Hintergrund besser. Die bekanntesten Verfahren zur Kantendetektion sind der **Sobel-Operator** (JÄHNE, 2012: 411) und der **Laplace-Operator** (JÄHNE, 2012: 371). Weiterhin ist die **Wasserscheidentransformation** zu nennen, die auf Graustufenbildern geschlossene Kantenzüge liefert. Eine explizite Ausführung der Funktionsweise dieser Verfahren erfolgt an dieser Stelle nicht (JÄHNE, 2012: 544ff.).

4.1.3 Regionenorientierte Verfahren

Das regionenbasierte Verfahren generiert Segmente in Form von homogenen Flächen. Unterschiedliche Merkmale wie Grauwerte oder Texturen bilden die Grundlage für das Homogenitätskriterium. Beispielsweise werden Durchschnittsgrauwerte von Punktmengen einer Region betrachtet und versucht zusammenhängende Objekte zu identifizieren. Hierfür können unterschiedliche Methoden zum Einsatz kommen. Eine der gebräuchlichsten Methoden ist das

Region-Growing. Dieses Verfahren wird auch als Flächen-Wachstums-Algorithmus bezeichnet. Als Anfangssegmente werden verschiedene Punkte, sogenannte Saat- oder Keimpunkte im Bild gesetzt. Im nächsten Schritt wachsen diese Startsegmente dann nach einem Homogenitätskriterium zu Regionen heran. Dabei werden Nachbarpunkte einer Region betrachtet. So wird z.B. der Grauwert des benachbarten Punktes mit dem Durchschnittswert aller Punkte der Region verglichen. Ist der Betrag aus der Differenz beider Grauwerte kleiner als der vordefinierte Schwellwert, wird der Punkt einer Region hinzugefügt. Erfüllt kein Nachbar der bereits gefundenen Region das Homogenitätskriterium, wird ein neuer Startpunkt generiert. Weiterhin werden nicht nur Nachbarpunkte, sondern auch benachbarte Regionen miteinander verglichen, was es ermöglicht, Regionen zu verbinden. Das Verfahren endet, wenn alle Bildpunkte einer Region zugewiesen sind (BAATZ & SCHÄPE, 2000; JÄHNE, 2012: 547).

Ein anderes Prinzip liefert das **Split-and-Merge** Verfahren, welches dem **Quadtree-Verfahren** entspricht. Hier wird versucht, mit Hilfe einer einfachen Aufteilung des Bildes eine vollständige Segmentierung zu erreichen. Das Bild wird als initiales Segment betrachtet, welches kontinuierlich in kleinere Segmente zerteilt wird. Zunächst wird ein Schwellwert, also das Homogenitätskriterium festgelegt. Der Grauwert eines Bildpunktes wird mit dem Durchschnittswert der Region verglichen. Liegen unterschiedliche Werte vor, wird das Bild unterteilt. Andernfalls wird bei Erfüllung der Homogenitätskriterien der Bildpunkt mit der Region vereinigt. Der Prozess läuft solange ab, bis alle Regionen zueinander nicht mehr homogen sind. Charakteristisch für das Endprodukt sind eckige und künstliche Kanten aufgrund der sukzessiven Aufteilung in immer kleinere, quadratische Regionen. Kantenglättungsverfahren können die Ergebnisse verbessern (ANDRESEN, 2004: 40; STEINBRECHER, 2005: 211 ff). Als ein weiteres Verfahren ist noch das **Pyramid-Linking** oder auch Pyramidenwachstum zu nennen. Es basiert auf einem Gaußalgorithmus und arbeitet mit einer pyramidenartigen Datenstruktur in verschiedenen Bildebenen. Das Eingangsbild stellt die unterste Ebene der Pyramide dar. Auf dessen Basis werden immer 4 x 4 Pixel einer Ebene zu einem Pixel in der nächst höheren Ebene (arithmetischem Mittelwert) verbunden. Dadurch werden die Bilder der nächst höheren Ebene um den Faktor vier verkleinert. Insbesondere bei stark verrauschten Bildern liefert das Pyramid-Linking gute Segmentierungsergebnisse, da jeder Pixel des Eingangsbildes einer benachbarten Klasse zugeordnet wird. Dabei können aber kleine Bildbereiche, die nicht zum Objekt gehören, vernachlässigt werden (ROSENFELD, 1984: 2ff.; FH-DORTMUND, 2015).

4.1.4 Modellbasierte Verfahren

Die bis zu diesem Punkt angesprochenen Segmentierungsverfahren beruhen auf lokalen Informationen. Das bedeutet, dass nur der einzelne Bildpunkt oder die lokale Umgebung betrachtet wird. Jedoch ist die menschliche Wahrnehmung gegenüber dem maschinellen Sehen weit ausgeprägter, da nicht nur lokale Informationen, also die einzelnen Bild- und Nachbarbildpunkte für sich betrachtet werden, sondern das Bild als Ganzes erkannt wird. Bei dem Modellbasierten Verfahren wird ein Vorwissen über das Bild vorausgesetzt. Dies kann beispielsweise die Form der geometrischen Objekte sein. Dieses Wissen kann dann mit den lokalen Informationen verglichen werden (JÄHNE, 2012: 551ff.).

Die **Hough-Transformation (HT)** ist ein allgemeiner Ansatz um beliebige, parametrisierbare Formen wie Gerade, Kreise und Ellipsen in Punktverteilungen zu lokalisieren und mit wenigen Parametern zu beschreiben. Da diese Formen kohärent mit künstlichen, von Menschenhand erschaffenen Objekten sind, ist diese Methode für die Analyse von Bildern besonders interessant.

Ausgehend von einem segmentierten Bild mit Kantenpunkten oder unterbrochenen Linien, kann die HT als Kantenverfolgungsalgorithmus diese Punkte und Linien zu geometrischen Objekten vervollkommen. Da dieses Verfahren einen rein mathematischen Ansatz liefert, ist es zuweilen sehr komplex und wird an dieser Stelle nur anhand eines einfachen Beispiels erläutert, um das Grundprinzipien zu verdeutlichen. Um die geometrischen Objekte zu identifizieren, wird ein zweiter Raum neben dem eigentlichen Bildraum erzeugt. Dieser wird auch Parameterraum oder Hough-Raum genannt. In diesem Raum werden für jeden Bildpunkt, der auf einer Kante liegt, alle Parameter des zu identifizierenden Objektes übertragen (siehe Abb. 4.1). Punkte im Parameterraum entsprechen somit geometrischen Objekten im Bildraum. Eine Gerade im zweidimensionalen Raum ist durch zwei reelwertige Parameter zu beschreiben. Das sind z.B. die Steigung und die Höhe des Schnittpunktes mit der y-Achse. Das Ziel ist es nun, jene Geradenparameter zu finden, auf denen möglichst viele Kantenpunkte liegen. Die HT ermittelt nun alle mögliche Geraden, die durch einen einzelnen, gegebenen Bildpunkt laufen. Jedem Punkt im Bild und seine durch ihn verlaufenen Geraden im Bildraum, entsprechen also exakt einer Gerade im Parameterraum. Je mehr dieser Geraden sich im Parameterraum schneiden, desto mehr Bildpunkte liegen auf der entsprechenden Geraden im Bildraum. Die Auswertung des Parameterraumes ergibt dann schließlich Häufungen, die den gesuchten Objekten entsprechen (BURGER & BURGE, 2005: 156 ff.; JÄHNE, 2012: 551ff.).

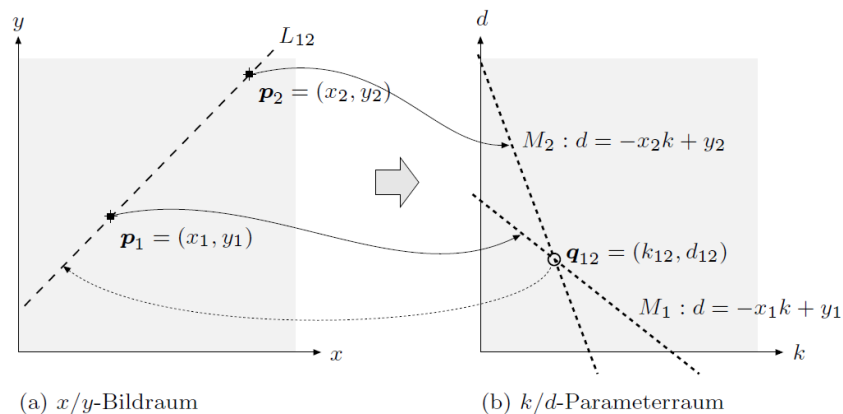


Abb. 4.1 Zusammenhang zwischen Bildraum und Parameterraum bei der Hough-Transformation (BURGER & BURGE, 2005: 159).

Die Abb. 4.1 verdeutlicht die Funktionsweise der HT. Die Parameterwerte für alle Geraden durch den Bildpunkt $p_i = x_i, y_i$ befinden sich im Parameterraum auf einer Geraden. Dagegen entspricht jeder Punkt $q_i = k_i, d_i$ im Parameterraum einer Geraden im Bildraum. Der Schnittpunkt der beiden Geraden an der Stelle q_{12} weist darauf hin, dass im Bildraum eine Gerade L_{12} mit zwei Punkten und den Parametern k_{12} und d_{12} existiert. Die Transformation jedes einzelnen Punktes in den Parameterraum führt jedoch auch zu Schwächen der Methode, denn sie ist mit einem hohen Rechenaufwand verbunden.

Ein anderes Konzept im Bereich der Modellbasierten Segmentierungsverfahren ist das **Template Matching**. Dieses Verfahren sei an dieser Stelle nur kurz angesprochen. Dessen grundlegende Idee darin besteht, das zu suchende Bildmuster (Template) über das Bild zu bewegen und die Differenz gegenüber dem darunterliegenden Teilbild zu messen. Stellen an denen das Template mit dem Teilbild übereinstimmt oder ähnelt werden markiert (BURGER & BURGE, 2005: 411 f.).

4.1.5 Texturorientierte Verfahren

In der Realität zeichnen sich Objekte nicht nur durch eine einheitliche Farbe, sondern auch durch deren Oberflächenstruktur aus. Texturen können am einfachsten als regelmäßige Variationen von Grauwerten einer Fläche verstanden werden. Sie spielen eine gesonderte Rolle, um z.B. Gebiete gleicher Grauwerte voneinander abzugrenzen. Qualitative Rückschlüsse über die Oberflächenbeschaffenheit sind dadurch möglich. Texturen sind also neben den übergeordneten Mustern bestimmend für die Bildinterpretation. Da es größtenteils nicht erklärbar ist, wie das menschliche Gehirn Texturen erfasst, sind qualitative Begrifflichkeiten wie fleckig, körnig, streifig etc. stark subjektiv geprägt und führen zu differenzierten Assoziation in der Wahrnehmung verschiedener Personen. Die Komplexität, Texturen rechengestützt zu erfassen, ist also enorm. Texturanalysen eines panchromatischen Bildes stellen einen zielführenden Untersuchungsansatz in sehr heterogenen, bebauten Siedlungsgebieten dar. Dies ist darin begründet, dass diese Parameter sich hier besonders stark von anderen Landbedeckungsarten abheben. Es gibt eine Vielzahl von Methoden die für die texturbasierte Segmentation entwickelt wurden (JÄHNE, 2012: 499ff.).

Ein dafür geeignetes Verfahren liefert die **Fourier-Transformation** (FT), die signaltheoretische Konzepte aufgreift. Die FT ist ein fundamentales Verfahren in der Signalverarbeitung und ermöglicht die Konvertierung von kontinuierlichen Signalen (Zeitpunkt, Abtastwert) in ein kontinuierliches Spektrum (Frequenz, Amplitude und Phasenlänge). Dieses Spektrum, auch Frequenzspektrum bzw. Spektralfunktion genannt, wird im sogenannten Frequenzraum dargestellt. Es geht also um die Zerlegung einer periodischen Funktion in ihre Sinus- und Cosinus-Anteile. Somit können Signale analysiert, gefiltert und geglättet werden und viele Operationen realisiert werden, die im Frequenzraum wesentlich leichter durchzuführen sind. Nachdem die Eigenschaften des Signals im Frequenzraum ausgewertet wurden, wird es mit Hilfe der inversen Fourier-Transformation zurücktransformiert. In manchen Fällen ist das gesamte Verfahren aus Transformation, Anwendung eines Operators und Rücktransformation schneller als die direkte Verarbeitung und Analyse des entsprechenden Signals. Tatsächlich können die meisten gängigen Operationen und Methoden der digitalen Bildverarbeitung im Signal- oder Bildraum dargestellt werden. Der Einsatz von Spektraltechniken hat im Zuge der gestiegenen Rechenleistung moderner Computer an Bedeutung verloren. Bestimmte Effekte und Verfahren können aber nur mithilfe spektrale Konzepte wesentlich einfacher oder überhaupt dargestellt werden. Insbesondere für lineare Filter- und Faltungsoperatoren, das Verständnis der allgemeinen Zusammenhänge bei der Abtastung (Diskretisierung) von kontinuierlichen Signalen und bei der Rekonstruktion und Interpolation von diskreten Signalen bietet der Ansatz Vorteile (BURGER & BURGE, 2005: 299 ff.). Andere Verfahrensweisen für texturbasierte Segmentierungen sind Cooccurrence-Matrizen, Texturenenergiemaße, Lauflängenmatrizen oder Markov-Random-Fields, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird (JÄHNE, 2012: 599ff.).

4.1.6 Segmentierung in eCognition

In der vorliegenden Arbeit wird das Softwarepaket Trimble eCognition (TRIMBLE, Version 9.1) für die Segmentierung verwendet. Daher wird an dieser Stelle ihre Funktionsweise detailliert beschrieben. Der sich anschließende Abschnitt basiert im Wesentlichen auf dem zitierten Handbuch und einer Arbeit von ANDRESEN (2004: 44 ff.). Die Software eCognition bietet verschiedenste Segmentierungsverfahren zur Zerlegung des Bildes in Bildobjekte an. Neben den in dieser Arbeit verwendeten Verfahren, wie der sehr komplexen Multiskalaren Segmentierung

(*Multiresolution Segmentation*) oder der Kontrast Filter Segmentierung (*Contrast Split Segmentation*), werden auch andere Methoden abgedeckt. Der Umfang der angebotenen Verfahren ist dabei groß. Er beinhaltet die *Quadtree-Based Segmentation*, die *Multi-Threshold Segmentation* u.v.a.m. Im Folgenden werden die beiden angewandten Segmentierungsverfahren kurz in ihrer Funktionsweise erläutert.

Kontrast Filter Segmentierung

Bei der Kontrast Filter Segmentierung (*Contrast Split Segmentation*) wird durch den Algorithmus das Bild oder Bildobjekte in dunkle und helle Regionen unterteilt. Die Unterteilung basiert auf einem definierten Schwellwert, welcher den Kontrast zwischen dem hellen Objekten (bestehend aus Pixeln mit Werten über der Schwellwertgrenze) und dunklen Objekten (bestehend aus Pixeln mit Werten darunter) nutzt. Der Algorithmus bewertet iterativ den optimalen Grenzverlauf der zu segmentierenden Bildobjekte im Gebiet. Dabei werden Pixelwerte zwischen den vorgegebenen minimalen und maximalen Schwellwerten geprüft. Wenn er Kontrast zwischen dem hellen und dunklen Objekt am höchsten ist, wird der Prüfschwellwert als optimal bewertet und eine Segmentgrenze gezogen (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 63).

Der Algorithmus führt als erstes eine *Chessboard Segmentation* durch. Das stellt das einfachste Segmentierungsverfahren dieser Software. Dabei wird das ganze Bild in quadratische Segmente gleicher Größe unterteilt. Die Größe dieser Quadrate wird nach in der Anzahl der Pixel bestimmt und vom Bearbeiter festgelegt. Die Grundeinstellung ist bei dem Wert 1.000 vordefiniert. Nach der Bildung der gleichgroßen quadratischen Segmente werden diese anhand der Kontrastgrenzen der hellen und dunklen Objekte weiter aufgetrennt. Weitere Einstellungsmöglichkeiten können das Segmentierungsergebniss verfeinern. Der minimale Schwellwert (*minimum threshold*) bildet die unterste berücksichtigte Grenze für die Teilung der Segmente. Der Algorithmus kalkuliert den Schwellwert der Grauwerte zwischen dem minimalen und maximalen Schwellwert (*maximum threshold*). Durch das Herabsenken des Wertes werden in erster Linie nur die weichen Kontrastsprünge segmentiert. Ein zu hoher maximaler Schwellwert führt dagegen zu harten Kontrastsprüngen. Abschließend werden die dunklen und hellen Segmente in die Klasse der hellen und in die Klasse der dunklen Objekte überführt. Das Ergebnis liefert ein segmentiertes Bild, in dem dunkle von hellen Objekten klar abgetrennt sind. Die Abb. 4.2 veranschaulicht die Funktionsweise des Algorithmus an einem konkreten Beispiel anhand eines nDOM (rechts). Im RGB (links) ist gut zu erkennen das die Segmentgrenze deutlich zwischen erhöhten und niedrige Objekten verläuft. Die Resultate aus dieser Segmentierung können als Grundlage für weitere Segmentierungsalgorithmen, wie der *Multiresolution Segmentation*, verwendet werden.

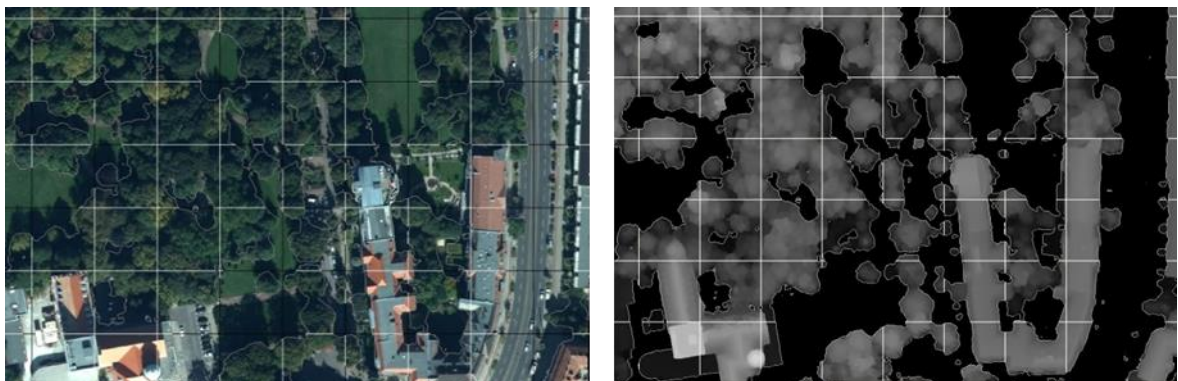


Abb. 4.2 Beispiel für Kontrast Filter Segmentierung: links RGB, rechts nDOM (ARNOLD, 2013: 32).

Multiskalare Segmentierung

HARALICK & SHAPIRO (1985) kommen in ihrer Erläuterung zu gebräuchlichen Segmentierungsansätzen zu dem Schluss, dass eine Segmentierung, die die Semantik der Objekte mit einbezieht eine wesentlich tiefere Analyse der Bildinformationen ermöglicht. BAATZ & SCHÄPE (2000) schlagen das Verfahren der Multiskalaren Segmentierung (*Multiresolution Segmentation*) vor, welches schon vor der Fusion die Homogenität benachbarter Objekte überprüft. Dabei wird die potenzielle Heterogenität des zukünftigen fusionierten Objektes berücksichtigt. Das kann in Form von einer klassifikationsbasierten Korrektur der segmentierten Bereiche geschehen, oder durch externe Informationen die dem Datensatz hinzugefügt werden.

Die Multiskalare Segmentierung minimiert die durchschnittliche regionale Heterogenität der Bildobjekte für eine gegebene Auflösung der Bildobjekte. Der Algorithmus verbindet nacheinander Pixel oder Objekte miteinander und gehört zu den regionenbasierten Verfahren. Dabei folgt es der *bottom-up* Strategie, basierend auf paarweiser Zusammenführender von Regionen (*Region-Merging*) Techniken. Das Verfahren stellt eine Optimierungsprozedur dar, welche für eine gegebene Anzahl von Bildobjekten die durchschnittliche Heterogenität minimiert und deren jeweilige Homogenität maximiert. Das Verfahren arbeitet gemäß den folgenden Regeln:

1. Die Segmentierungsprozedur startet bei einzelnen Bildpixeln und fusioniert diese wiederholend in mehreren Durchläufen (*Loops*) zu größeren Segmenten solange, bis der obere Schwellwert des Homogenitätskriteriums nicht überschritten wird. Dieses Kriterium ist eine Kombination aus Farb- und Formeigenschaften. Die Berechnung kann durch den Skalierungsparameter (*scale parameter*) beeinflusst werden.
2. Im ersten Schritt sucht die Saatzelle nach ihrem am besten passenden Nachbarpixel für eine potentielle Fusion.
3. Sind die Fusionsparameter der Nachbarn nicht kompatibel, wird der nächst besser passende Pixel zu der neuen Saatzelle gesucht usw.
4. Ist die beste Nachbarschaftskombination gefunden, werden die Bildobjekte zusammengeführt.
5. In jedem Durchlauf (*Loop*) wird jedes Bildobjekt einmal angefasst.
6. Die Durchläufe (*Loops*) laufen solange ab, bis keine Fusionen mehr möglich sind.

Mit der Multiskalaren Segmentierung lassen sich gute Modellierungen erzielen. Die hohen Anforderungen an die Rechenleistung macht diese Verfahren jedoch nicht immer zu der besten Wahl (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 66 ff.).

Grundkonzept der Segmentierung in eCognition

Da das pixelweise systematische Abtasten eines Bildes mittels eines Filters Fehler nach sich ziehen kann, ist es von Vorteil, die Segmentierung eines Bildes mit einer Sequenz von Bildobjekten, die genau einen Bildpunkt enthalten, zu beginnen. Dabei müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

1. Jeder Punkt, bzw. jedes Objekt darf nur einmal pro Durchgang bearbeitet werden.
2. Anschließende Fusionen sollten soweit wie möglich entfernt voneinander ablaufen.

Das Programm eCognition arbeitet mit Sequenzen, die systematisch die Punkte wählen, welche in maximaler Distanz zueinander stehen, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Der

stochastische Einfluss kann im Extremfall dazu führen, dass unterschiedliche Segmente bei gleichen Startparametern entstehen. Um eine gleiche Handhabung von heterogenen und homogenen Bildbereichen sicherzustellen, ist die Differenzierbarkeit des Segmentierungsalgorithmus, welcher von einer höheren Anzahl an Startpunkten profitiert, ausschlaggebend. Dieses Verfahren wird *distributed treatment order* genannt. Die Fusion oder Auftrennung von Objekten basiert auf lokalen Homogenitätskriterien und endet, wenn die Toleranzschwelle erreicht ist. Die Bestimmung der Homogenität kann über zwei unterschiedliche Methoden erfolgen. In der einen Operation wird die potenzielle Homogenität eines zukünftigen Objektes nach der Verschmelzung berechnet, während in dem anderen Verfahren die gewählten Homogenitätsmaße zweier benachbarter Bildpunkte direkt verglichen werden. Die durchschnittlich gewichtete Standardabweichung der Farbmittelwerte der Bildobjekte dient als Homogenitätsmaß, welches gemittelt über jedes Bildelement möglichst gering zu halten ist.

Für die Behandlung der Homogenitätskriterien bei n -Kanälen (also beispielsweise bei multispektralen Fernerkundungsdatensätzen) kann im einfachsten Fall ein absolutes Kriterium genutzt werden. Das bedeutet, dass über alle Kanäle das Homogenitätskriterium erfüllt sein muss. Das trägt der Tatsache Rechnung, dass Bildstrukturen als unterschiedlich interpretiert werden, wenn auch nur in einem Kanal eine Varianz auftritt. Die Gewichtung der Kanäle stellt eine andere Möglichkeit dar. Dabei können Homogenitätskriterien in allen Kanälen ermittelt, aufsummiert oder gemittelt werden, um dann mit Hilfe der Gewichtung die Ergebnisse zu verbessern (BAATZ, et al, 1998). Die Formhomogenität kann neben den rein spektralen Homogenitätskriterien für geometrische Parameter eines Objektes nützlich sein. So ist beispielsweise die Berechnung der idealen kompakten Form über die Beziehung der Kantenlänge und der Wurzel aus der Objektgröße möglich (BAATZ & SCHÄPE, 2000).

Für jede Fusion von Segmenten werden Kostenfunktionen der Fusionsparameter berechnet. Somit wird der Grad der Übereinstimmung von angrenzenden Segmenten beschrieben. Wenn der „Grad der Übereinstimmung“ kleiner ist als ein gegebener „kleinster Grad der Übereinstimmung“, der in eCognition als *scale parameter* bezeichnet wird, kommt es zu einer Verschmelzung. Die Homogenität der Objekte (*degree of fitting*) wird anhand von vier Konzepten über die zugehörige Entscheidungsregel bewertet.

1. Einfache Passung (*fitting*): Wenn das Homogenitätskriterium erfüllt ist, findet eine Fusion von Objekt A mit irgendeinem Nachbarn statt.
2. Bestpassung (*best fitting*): Wenn das Homogenitätskriterium bezogen auf das Abbruchkriterium (*scale parameter*) erfüllt ist, wird ein Objekt A mit seinem Nachbarn fusioniert.
3. Gegenseitige Bestpassung (*local mutual best fitting*): Für Objekt A soll der Nachbar B nach dem am besten zutreffenden Homogenitätskriterium gefunden werden. Das gleiche geschieht für Objekt B und den Nachbarn C. Als nächstes werden die Segmentpaare wechselseitig auf ihre Homogenität zueinander hin geprüft. Dieser Zyklus wiederholt sich so lange, bis das passende Paar in der direkten Umgebung zu Objekt A gefunden wurde. In der direkten Umgebung von Objekten findet man selbst bei hohen spektralen Unterschieden die beste Homogenität. Auch unterschiedlich texturierte Objekte werden symmetrisch behandelt.
4. Globale Bestpassung (*global mutual best fitting*): Das am besten erfüllte Homogenitätskriterium für nachbarschaftliche Objekte wird im gesamten Bildbereich gesucht. Darauf folgend wird das Segmentpaar von angrenzenden Objekten fusioniert, welche die am besten zutreffende Homogenität besitzen. Hier kommt die *distributed*

treatment order nicht zur Anwendung. Daraus ergibt sich, dass die Objekte nicht gleichmäßig wachsen und ein Ungleichgewicht zwischen Regionen mit geringem und hohem Kontrast auftreten kann.

Das Segmentierungsverfahren ist iterativ, da sich das Homogenitätsmaß der Objekte bei einer Verschmelzung oder Trennung der Segmente verändert. Es wird so oft durchgeführt, bis das Ergebnis konvergiert und bezüglich weiterer Bearbeitung stabil bleibt (BAATZ et al., 1998). So besteht die Möglichkeit, dass Bildelemente die zuvor das Homogenitätskriterium nicht erfüllen konnten nunmehr passen, während andere Elemente, die Bestandteil eines Segmentes sind, nicht mehr passen.

Damit bietet eCognition eine geeignete Softwareplattform, um die Kriterien der Segmentierungsanforderungen für die sich anschließende objektbasierte Klassifizierung von Gebäuden und Gebäudestrukturen zu erfüllen.

Ergebnis der Segmentierung

Die miteinander verbundenen Bildobjekte erzeugen ein hierarchisches Netzwerk. Die Bildinformationen werden in verschiedenen Maßstabsebenen gleichzeitig repräsentiert. Die Bildobjekte sind miteinander verknüpft, wodurch jedes Objekt seinen Nachbarn sowie seine Ober- bzw. Unterobjekte zuordnen kann. Die Grenzen der Objekte sind konsistent. Das bedeutet, dass die Topologie des Netzwerkes so definiert ist, dass sich die Grenzen von unteren Objekten innerhalb der Grenzen von darüber liegenden Objekten befinden. Jede neue Ebene wird somit direkt aus ihren Unterobjekten erzeugt. Dieser Prozess wird schematisch in Abb. 4.3 visualisiert.

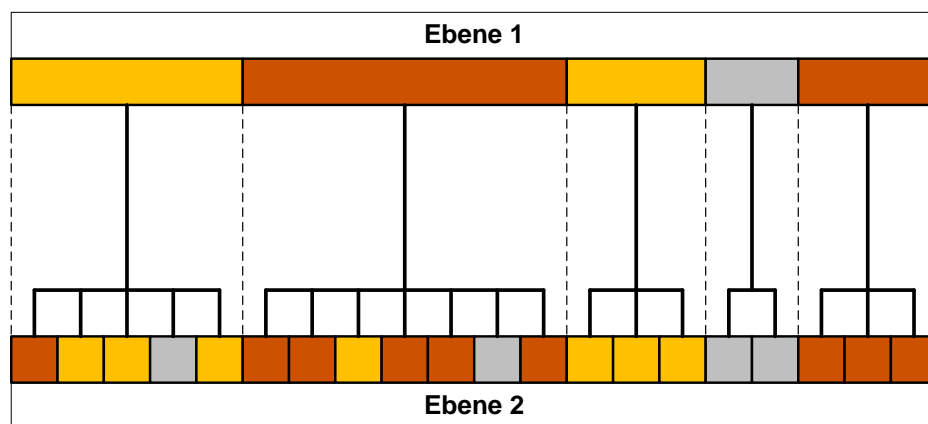


Abb. 4.3 Hierarchisches Netzwerk von Bildobjekten auf zwei Ebenen. Bildpunkte in Ebene 2 werden zu Bildobjekten in Ebene 1 zusammengefasst (adaptiert nach ANDRESEN, 2004: 49).

Eine Objektdatenbank wird zusätzlich neben der Segmentierung erzeugt und enthält neben den spektralen Eigenschaften der Objekte zusätzliche berechnete Eigenschaften, wie z.B. geometrische Attribute. Somit sind weit mehr Informationen verfügbar, als ein nur auf Pixelbasis beruhender Segmentierungsalgorithmus (ANDRESEN, 2004: 48 f.).

4.2 Objektdatenbank

Zur Interpretation wird Erfahrungswissen benötigt, da sich Objekte innerhalb einer Klasse in der Natur selten exakt gleichen (GROWE, 2000: 10). Während des Segmentierungsverfahrens wird in eCognition eine Datenbank mit Informationen zu jedem Bildobjekt erzeugt. In ihnen werden neben Spektralen Eigenschaften und deren Statistik wie Mittelwert und Standardabweichung auch Informationen über die Nachbarschaft von Objekten gespeichert. Es besteht die Möglichkeit

zwischen den direkt angrenzenden Nachbarn erster Ordnung und weiter entfernten Nachbarn Unterscheidungen zu treffen. So kann bezüglich der direkten Nachbarschaft beispielsweise die Differenz der Grauwerte zum Nachbarn ausgewertet werden. Weiterhin sind auch klassifikationsbasierte Nachbarschaftsparameter von Bedeutung. Somit können Objekteigenschaften wie die Distanz oder die Länge der Grenze zu einer bestimmten Klasse analysiert werden. So lassen sich erhöhte Strukturen auf Gebäuden, die eigentlich einer anderen Klasse zugeordnet werden müssten sehr leicht unterscheiden, indem sie als diejenigen Objekte definiert werden, die zu 100 % von der darunter liegenden Klassen umgeben sein müssen. Dabei stellt die große Anzahl der Objekteigenschaften den Interpreten vor das Problem diese zu bewerten und die relevantesten auszuwählen. Die Unterteilung der Eigenschaften lässt sich partiell in stabil und instabil untergliedern (MOTT et al., 2002). Spektrale Eigenschaften werden als instabil gewertet, da diese direkt anhängig von den Aufnahmebedingungen sind (siehe Abb.4.4).

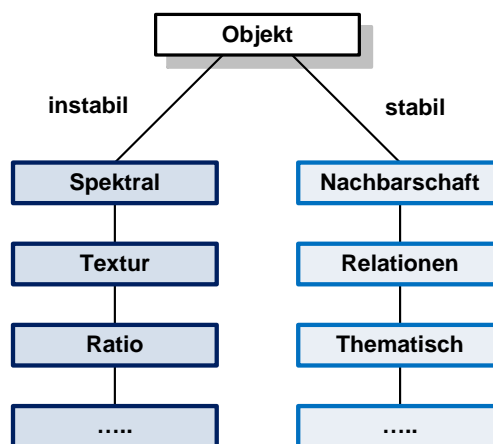


Abb. 4.4 Stabile und instabile Eigenschaften in der eCognition Objektdatenbank (ANDRESEN, 2004: 51).

Somit gehören auch die sich aus den spektralen Eigenschaften ableitenden Objekteigenschaften wie Texturen in diese Klasse. Dahingegen werden semantische Eigenschaften als stabil beschrieben. Diese geben z.B. die relative Lage von Objekten. So kann man davon ausgehen, dass ein Feuchtgebiet immer in der Nähe zu Wasser befindet, losgelöst von seiner spektralen Charakteristik (ANDRESEN, 2004: 50 ff.).

4.3 Wissensrepräsentation

Die Wissensrepräsentation in eCognition basiert auf Regelwerken in Kombination mit einem semantischen Netz. Zwei Netze werden erzeugt. Das eine enthält die semantischen Struktureinheiten (Objekte), das andere beinhaltet die semantischen Wissensseinheiten (Regeln). Beide Netze werden für die Auswertung miteinander kombiniert (BAATZ et al, 2001). Die Klassenhierarchie besteht aus Klassen (Objektdefinitionen) und ist innerhalb der eCognition Regelwerke eingebettet. Das Regelwerk ist ein Oberbegriff welcher die Klassenhierarchie und die darin enthaltenen Klassen umschreibt. Regelwerke repräsentieren das Wissen in sogenannten If-Then-Beziehungen (Wenn-Dann), und kann als Bedingungs- und Anwendungsteil verstanden werden. Weiterhin lassen sich Objektklassen die mit Hilfe der Regelwerke definiert werden in zwei unterschiedliche Arten hierarchisch kombinieren. Sie können einer Vererbungsstrategie von Eltern- und Kindklassen folgen. So kann die Oberklasse Gebäude ihrer Eigenschaften und Informationen an Unterklassen wie Tiefgarage oder Dachstuhl vererben. Dabei steigt die Detailgenauigkeit, je tiefer die Klassenhierarchie sich verzweigt (BAATZ et al, 2002). Damit lassen

sich auch unterschiedliche Maßstabsebenen der Segmentierung in der Klassenhierarchie abbilden. Somit können Unterklassen zu Oberklassen kombiniert werden. Analog dazu wird eine Hierarchie semantischer Objektklassenbeziehungen (Gruppenhierarchie) aufgebaut. Diese ermöglicht es Klassen mit unterschiedlichen Attributen zu einer semantischen Oberklasse mit einer neuen Bedeutung zu kombinieren. Sie sind nicht zwingend auf eine eigene Klassenbeschreibung angewiesen und lassen sich zu einer Oberklasse zusammenfassen (ANDRESEN, 2004: 51 f.).

4.4 Merkmalsgewinnung und Klassifikation

Die Merkmalsextraktion bildet das Grundgerüst für die anschließende Klassifikation. Die Voraussetzung für die Merkmalsgewinnung ist, dass die pixelbasierte Darstellung eines Bildes bereits objektbasiert vollzogen ist (Segmentierung). Dieser Abschnitt betrachtet, wie Merkmale von Objekten definiert und ermittelt werden. Anhand dieser Merkmale können verschiedene Objekte unterschieden und klassifiziert werden. Die Festlegung, wann Objekte Ähnlichkeiten oder Unterschiede aufweisen, bildet die Grundlage für die Definition von Merkmalen und ist immer in Abhängigkeit von der Anwendung zu betrachten. Des Weiteren muss beachtet werden, welche Objekte im Bild vorkommen. Geeignete Merkmale müssen für gleiche Objekte gleiche Werte und für unterschiedliche Objekte unterschiedliche Werte liefern. Zunächst muss untersucht werden, wann Objekte gleich sind. Z.B. können Rechtecke als gleich definiert werden, wenn sie die gleiche Fläche, das gleiche Seitenverhältnis oder die gleiche Ausrichtung haben. Wenn man Merkmale gefunden hat, die für gleiche Objekte gleiche Werte liefern, müssen diese als nächstes auf ihre Vollständigkeit hin überprüft werden. Das bedeutet, dass alle als unterschiedlich definierten Objekte auch unterschiedliche Werte in mindestens einem Merkmal aufweisen müssen. Einfache Merkmale von binären Objekten sind beispielsweise der Umfang, die Fläche, die Kompaktheit oder die Anzahl der in einem Objekt vorkommenden Löcher (LANG, 2013: 2 f.). Im Rahmen der Aufgabenstellung dieser Arbeit sind die wichtigsten Merkmale zur Extraktion von Gebäudestrukturen geometrische wie die Höhe und die Fläche sowie spektrale wie der Vegetationsindex. Wenn die Form der Objekte bekannt ist, können morphologische Operatoren dazu eingesetzt werden, die Form zu analysieren oder zu verändern bzw. weitere Parameter wie den mittleren Grauwert, die Fläche, den Umfang oder andere Formbeschreibungen des Objektes zu ermitteln. Diese Parameter können dann benutzt werden, um Objekte zu klassifizieren (JÄHNE, 2012: 14).

Die Klassifikation ist der Prozess der Zuordnung eines Objektes zu einer Klasse. Diese Zuordnung erfolgt mithilfe eines Klassifikators, der durch einen Algorithmus oder ein Programm einer Klasse Merkmale zuordnet. Wenn Merkmale für Objekte festgelegt sind, können sie anhand dieser Merkmale unterschieden und in Objektklassen eingeteilt werden. Für die Zuordnung eines neuen Objektes zu einer Objektklasse werden dessen Merkmale mit den Merkmalsklassen verglichen. Bei einer Ähnlichkeit mit einer bekannten Objektklasse, erfolgt eine Zuordnung des Objektes zu dieser Klasse. Dieser Vorgang wird als Klassifikation bezeichnet (LANG, 2013: 3 f.). Sind die Merkmale der Objektklassen von vornherein bekannt, kann man die Segmentierung zielgerichtet darauf auslegen.

Man unterscheidet zwei grundlegende Ansätze. Zum einen werden ausschließlich die im digitalen Bildmaterial enthaltenen Informationen verwendet. Dieses Herangehen wird als *unüberwachte Klassifikation* bezeichnet und verfolgt einen rein statistischen Ansatz. Das bedeutet, Gruppen von ähnlichen Pixeln werden identifiziert. Deren Ähnlichkeit muss klar definiert sein. Mittels eines Klassifikators wird iterativ jedes Bildelement einer Teilgesamtheit zugeordnet. Der zweite Ansatz

ist die *überwachte Klassifikation*. In der Regel werden die Merkmale der einzelnen Objektklassen vorher festgelegt und dann zu den vorgegebenen Klassen zugeordnet. Weiterhin werden z.B. Informationen wie zusätzliche Daten oder Karten verwendet. Zuerst werden Objekte aus einer Datenbasis zufällig ausgewählt und zu Trainingsgebieten zusammengestellt. Zu jedem Objekt wird in einem zusätzlichen Attribut die Klasse festgelegt, zu der es gehört. Die Zuordnung erfolgt über einen Klassifizierungsalgorithmus, der die Pixel ausgehend von ihren Werten, den verschiedenen Klassen zuordnet. Im Regelfall führen überwachte Verfahren, die maßgeblich vom Interpreten selbst gesteuert werden, zu besseren Klassifikationsergebnissen (SCHOWENGERDT, 1997: 399 ff.). Auch der Ansatz in der vorliegenden Arbeit geht von einer überwachten Klassifizierung aus.

5 Umsetzung der Objektextraktion

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Durchführung der OBIA. Das bedeutet, die Segmentierungs- und Klassifizierungsprozesse werden erläutert. Weiterhin werden die Gebäudeklassen definiert und diskutiert sowie der Workflow präsentiert, der den gesamten OBIA-Ablauf anschaulich darstellt.

5.1 Gebäudeklassen

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die bauspezifischen Verordnungen zur Geschosshöhe betrachtet und analysiert. Dies ist erforderlich, da es keine einheitliche Festlegung von Geschosshöhen gibt. Deshalb muss zunächst ein einheitliches Geschosshöhenmaß definiert werden, das einem Durchschnittswert entspricht, der es erlaubt die Geschossanzahl mit der tatsächlichen Gebäudehöhe zu korrelieren. Anschließend wird die Klasseneinteilung der Gebäude für die OBIA begründet und diskutiert.

Geschosshöhen von Gebäuden nach der Bauordnung

Um eine Typisierung von Gebäudeobjekten in einem urbanen Umfeld durchführen zu können, muss zunächst geklärt werden, wie sich nach der deutschen Bauordnung ein Gebäude definiert. Das ist in der Bauordnung für Berlin (BauO Bln) § 2 Abs. 2 vom 29. Juni 2011 festgelegt. In ihr werden Gebäude als „selbstständig benutzbare, überdeckte Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet oder bestimmt sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen“, charakterisiert. Da die Klassifizierung in erster Linie nicht über die spektralen Eigenschaften der Gebäude erfolgt, sondern über die Höhenstufen im nDOM, stellt die durchschnittliche Geschosshöhe eine wichtige Variable dar. Der § 2 Abs. 3 bestimmt „deren Höhe als das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich oder ein Stellplatz vorgesehen ist, über der Geländeoberfläche im Mittel“ (SENSTADT, 2011: 4ff).

Als Geschosshöhenbezugsmaß wird im Folgenden das auf dem § 48 der Bauordnung für Berlin (BauO Bln, 2005) festgelegte Maß für Aufenthaltsräume verwendet. Danach müssen Aufenthaltsräume eine lichte Raumhöhe von mindestens 2,5 m haben. Aufenthaltsräume im Dachraum müssen eine lichte Raumhöhe von mindestens 2,3 m über mindestens der Hälfte ihrer Netto-Grundfläche haben. Raumteile mit einer lichten Raumhöhe bis zu 1,5 m bleiben außer Betracht (SENSTADT, 2011: 33). Nach Angaben des Instituts für Raumentwicklung IRAP der Hochschule Rapperswil vom (2006:5) wird die lichte Höhe als der Höhenunterschied zwischen der Oberkante des fertigen Bodens und der Unterkante der fertigen Decke bzw. Balkenlage bestimmt (siehe Abb. 5.1). Somit gilt die lichte Höhe als eine Hilfsgröße zur Definition von wohnhygienischen und arbeitsphysiologischen Mindestanforderungen. Beispielsweise wird die Nutzbarkeit der Raumhöhe nicht zwingend durch die Sichtbarkeit einzelner Balken beeinflusst. Die Geschosshöhe selber wird von der Oberkante zur Oberkante der fertigen Böden gemessen (IRAP, 2006: 5).

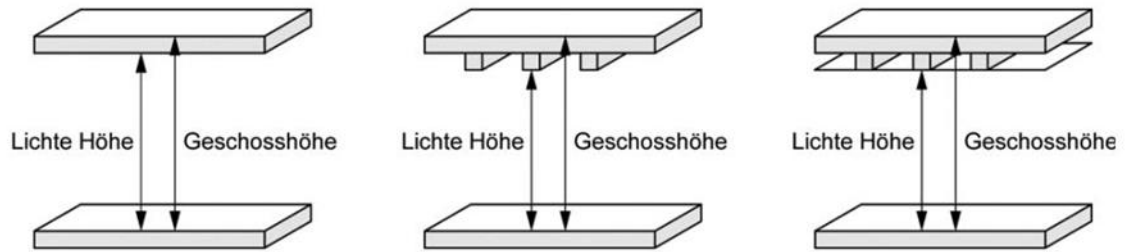


Abb. 5.1 Veranschaulichung der Definition von Lichte Höhe und Geschosshöhe nach IRAP (2006: 5).

Die Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz Auslegungsfragen zur Energieeinsparverordnung – Teil 19 hat nach Anlage 1 Nummer 1.3.3 Satz 2 EnEV 2013 für die Bestimmung der durchschnittlichen Geschosshöhe festgelegt, dass diese Geschosshöhe von der Oberfläche des Fußbodens zur Oberfläche des Fußbodens des darüber liegenden Geschosses gemessen werden soll. Dachgeschosse werden laut Verordnung nicht definiert und werden demzufolge nicht einbezogen. Der Mittelwert wird ausschließlich für die Höhe der darunterliegenden Geschosse bestimmt. Bei der Berechnung der durchschnittlichen Geschosshöhe von Gebäuden unter Zuhilfenahme der Gebäudenutzfläche kann es bei unüblichen Geschosshöhen zu maßgeblich abweichenden Resultaten kommen. Hier sind allen voran Altbauten mit hohen oder niedrigen Decken, sowie alte Fachwerkhäuser, Gartenlauben oder Geschosswohnungsbauten der Gründerzeit zu benennen (ARGEBAU, EnEV, 2013: 9f.).

Daher ist die Berechnung von Maßen für die durchschnittliche Geschosshöhe nur hinsichtlich einzelner Gebäudestrukturen oder der Planung von neuen Gebäudekomplexen anwendbar. Im Hinblick auf eine automatisierte flächendeckende Methode zur Erfassung und Extraktion von Gebäudestrukturen im Raum Berlin ohne die Verwendung von Liegenschaftsdaten oder anderen vektoriellen Daten, Bauplänen oder statistischen Daten, ist eine flächenhaft automatisierte Berechnung der einzelnen Geschosshöhen der Gebäudetypen nicht möglich.

Deshalb musste für die vorliegende Arbeit ein annäherungsweise Maß eingeführt werden, welches den allgemeinen Durchschnitt von Geschossen am besten darstellt. Das bedeutet, es wurde eine Mittelung der Werte zwischen Gebäuden mit Geschosshöhen unter 2,5 m sowie über 3 m getroffen werden. Da die Spannweite der mittleren Geschosshöhe in Berlin sehr groß ist (teilweise Altbauten mit bis zu - 4 m Deckenhöhe vs. Fachwerkhäuser unter 2,3 m Deckenhöhe), ist ein geeignetes Maß nur näherungsweise bestimmbar. Der sehr verbreitete Wohnhaustyp Q3a, der in der DDR sehr häufig gebaut wurde, hatte ein genaues Maß für die Raumhöhe, die Fußbodendicke sowie der Decke selber (BBSR, 2014a: 1f.). Weitere bekannte Wohnhausmodelle aus der DDR, wie die Wohnungsbauserie 70 (WBS70) (BBSR, 2014b: 1f.) oder der Plattenbautyp 2 (P2) (BBSR, 2014c: 1f.) verwendeten dieselben Maße in ihren Plattenbauserien. Aus der Raumhöhe von 2,8 m, der Decke mit ca. 15 cm dicke sowie der Fußbodendicke von ca. 7,5 cm errechnet sich ein gerundeter Wert von durchschnittlich 3 m Geschosshöhe für Plattenbausysteme aus der DDR. Da sehr viele Neubauhäuser i.d.R. diesem Maß entsprechen, bzw. ohnehin der Bauordnung Berlin wie oben erwähnt unterstellt sind, kann man für diese Gebäude (Plattenbau bzw. Neubau) von einem tatsächlichen Maß von 3 m Geschosshöhe ausgehen.

Die Baualterstufe der Gründerzeit, also die Häuser die um die Jahrhundertwende 19/20 erbaut wurden, bilden die charakteristische Gruppe der innerstädtischen Altbauten. Deren besonderes Merkmal sind vor allem die großen Geschosshöhen von bis zu 4 m (BAUNETZ WISSEN, 2015).

Die bauordnungsrechtlichen Anforderungen orientieren sich nicht mehr an der ehemals verwendeten Anzahl der Vollgeschosse sondern an fünf in §2 Abs. 3 definierten Gebäudeklassen (SENSTADT, 2007: 5). Sie gelten nach § 2 Abs. 11 als Vollgeschosse, wenn ihre Oberkante im Mittel mehr als 1,4 m über die Geländeoberfläche hinausragt und sie über mindestens zwei Drittel ihrer Grundfläche eine lichte Höhe von mindestens 2,3 m aufweisen (SENSTADT, 2011: 4ff.).

Die wesentlichsten Kriterien für die Einteilung eines Gebäudes in eine Gebäudeklasse sind (SENSTADT, 2007: 5):

- Die Anzahl der Nutzungseinheiten
- Die Größe der Nutzungseinheiten
- Die Höhe der Lage des Fußbodens des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist.

Die Abb. 5.2 zeigt die Gebäudeklassen entsprechend der Einteilung der Bauordnung für Berlin.

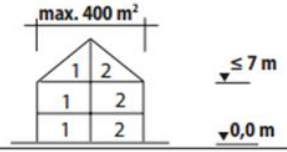




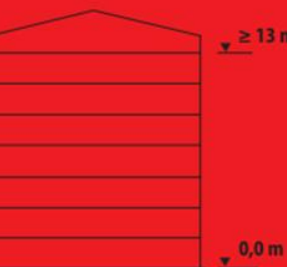
GK 1	a	Freistehende Gebäude mit einer Höhe* bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m ² **	
	b	Freistehende land- und forstwirtschaftlich genutzte Gebäude	
GK 2		Gebäude mit einer Höhe* bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m ² **	
GK 3		Sonstige Gebäude mit einer Höhe* bis zu 7 m	
GK 4		Gebäude mit einer Höhe* bis zu 13 m und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m ² **	
GK 5		Sonstige Gebäude einschließlich unterirdischer Gebäude	










Abb. 5.2 Gebäudeklassen (GK) nach der Einteilung der Bauordnung für Berlin (SENSTADT, 2007: 5).

Die Einteilung dieser Klassen ist im Hinblick auf die aus fernerkundlicher Sicht abgeleitete Typisierung der Gebäudestrukturen nicht anwendbar. Da in einem urbanen Gebiet mit einem hohen Anteil an Gebäuden über einer Geschosshöhe von 13 Metern zu rechnen ist, würde nach dieser Nomenklatur der Großteil der Gebäude in die Klasse GK5 fallen. Für die Geschosshöhe wurde daher für Neu- und Plattenbauobjekte eine durchschnittliche Geschosshöhe von 3 m angenommen. Bauwerke aus der Gründerzeit, also Altbauten werden mit einer Geschosshöhe von 4 m definiert.

Definition der Gebäudeklassen

Das größte Problem im Hinblick auf eine Hierarchisierung und Klassifizierung von Gebäuden für die Bestimmung von Attraktivitätsmerkmalen von Wohnstandorten in architektonisch vielseitigen und abwechslungsreichen urbanen Arealen wie Berlin ist, dass es keine einheitliche und universell anwendbare Lösung gibt. Die Einteilung der Gebäude in die fünf Gebäudeklassen (SENSTADT, 2007: 5) ist zu grob, um sie für die Fragestellung der Arbeit hin anwenden zu können. Alleine auf die Klasse GK5 würden über 2/3 aller Gebäude im Untersuchungsgebiet I entfallen. Ebenso ist die Definition, ab wann ein Geschoss oder Vollgeschoss beginnt, noch keine Aussage über die Definition eines Gebäudes allgemein. Diese ist also nicht allein von der Geschosshöhe abhängig, da z.B. auch Tiefgaragen als Gebäude in der ALK geführt werden. Eine eindeutige Bestimmung, ab welcher Geschosshöhe ein Gebäude fernerkundlich als solches erfasst werden soll, ist also notwendig. Hierbei kann nicht auf Bauverordnungen zurückgegriffen werden. Vielmehr ist die Definition der Klassenstufen für die konkrete Fragestellung auszulegen. D.h. an dieser Stelle muss ein eigener Wert definiert werden, der eine realistische Maßeinheit für ein Gebäude widerspiegelt, welches aus nur einem Geschoss, ohne erhabene Dachaufbauten, wie z.B. einem Spitzdach besteht. Da nach dem § 48 der BauO Bln Aufenthaltsräume eine lichte Raumhöhe von min. 2,5 m aufweisen müssen, und darauf die Dicke eines flachen Daches mit Isolation von ca. 30 cm angenommen wird, errechnet sich für die Klassenzuordnung eines Gebäudes die Höhe von 2,8 m über dem Boden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich der Boden des Gebäudes auf dem Grund (0 m) befindet. Somit kann teilweise vermieden werden, dass Strukturen unter diesem Wert in die Klassifizierung von Gebäuden mit einfließen. Das betrifft vor allem Strukturen wie Mauern, Garagen, Schuppen u.v.m. In einzelnen Fällen kann es natürlich zu einer Unterklassifizierung kommen, da die Dachoberkannte eines oberirdischen Geschosses nach § 2 Abs. 11 (SENSTADT 2011: 4ff) mit mehr als 1,4 m über die Geländeoberfläche definiert ist. Da bei dieser fernerkundlichen Analyse nicht alle baulichen Besonderheiten abgedeckt werden können, gilt es ein Maß festzulegen, welches sich die Waage zwischen einer zu starken Untererfassung und einer zu starken Übererfassung von Objekten hält. Die iterative, visuelle Untersuchung der Schwellwertgrenze hat den Wert von 2,8 m als Gebäudehöhe ergeben, aus dem sich im Folgenden die klassifizierten Gebäude weiter unterteilen. Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass im weiteren Verlauf alle Etagen inklusive des Erdgeschosses gezählt werden.

Die Tab. 5.1 zeigt die Klassen, die für die Untersuchung definiert wurden. Da durch die Teilung Berlins und den Wiederaufbau in der Nachkriegszeit unterschiedliche architektonische, wirtschaftliche und politische Einflüsse, das Bild in beiden Teilen der Stadt geprägt haben, sind Gebäude verschiedenster Baustile entstanden.

		Gebäudeklassen nach Geschosszahl	Gebäudehöhe (h)
A		Hochhaus ab 21 Etagen	$60 \text{ m} \leq h \leq 91 \text{ m}$
B		Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	$53 \text{ m} \leq h < 60 \text{ m}$
C		Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	$32 \text{ m} \leq h < 53 \text{ m}$
D		Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	$25 \text{ m} \leq h < 32 \text{ m}$
E		Flachdachgebäude zwischen 3 bis 7 Etagen	$13 \text{ m} \leq h < 25 \text{ m}$ (< 50° Dachneigung)
F		Spitzdachgebäude zwischen 3 bis 5 Etagen	$13 \text{ m} \leq h < 25 \text{ m}$ (> 50° Dachneigung)
G		Gebäude unter 3 Etagen	< 13 m
H		Einfamilienwohnhaus	< 13 m (< 300 m² Fläche)
I		Gebäude mit spezieller Nutzung	< 13m (> 5000 m² Fläche)

Tab. 5.1 Definition der Gebäudeklassen.

Eine Bestimmung, sich klar voneinander abgrenzender Gebäudeklassen wie in einer Planstadt, ist kaum möglich. Es gibt keine allgemein verbindliche Definition über Größe und Art von Wohnquartieren oder Stadtteilen (Großwohnsiedlung). Dies liegt daran, dass sie in relativ kurzer Zeit entstanden sind, um die Wohnungsnot zu decken und daher auch nicht durch eine kontinuierliche Erweiterung gewachsen sind. Lediglich ihre dichte, hochgeschossige, relativ homogene Bebauung und ihre Entstehungszeit nach 1945 können Aufschlüsse über Gebäudetypen, deren Morphologie und Wohnqualität liefern. Da ebenfalls nicht jeder Gebäudekomplex einer Bauserie entsprang, ist auch hier eine hohe Varianz von Gebäudetypen zu unterscheiden. Im Folgenden wurde anhand von Recherchen ein Höhenindex der relevanten Wohngebäude in Berlin angelegt und darauf basierend eine nachvollziehbare Klasseneinteilung entworfen, die für die beiden partiell unterschiedlichen, architektonischen Gebiete Gültigkeit besitzt. Da keine Daten über die spezifischen Eigenschaften von Plattenbauserien in der BRD zur Verfügung standen, ist die Einteilung der Klassen an den Plattenbauserien der DDR orientiert. Das Untersuchungsgebiet I deckt alle Gebäudehöhenstufen ab, wohingegen das zweite Gebiet eher die spezifischen Besonderheiten der Vorkriegsarchitektur widerspiegelt. Somit wurde die Klassifikationseinteilung und anschließende OBIA unter Berücksichtigung der Eigenschaften beider Gebiete, anhand des ersten Gebietes entwickelt und anhand des zweiten weiter verfeinert und überprüft.

Abb. 5.3 visualisiert die Hierarchie der Gebäudeklassen.

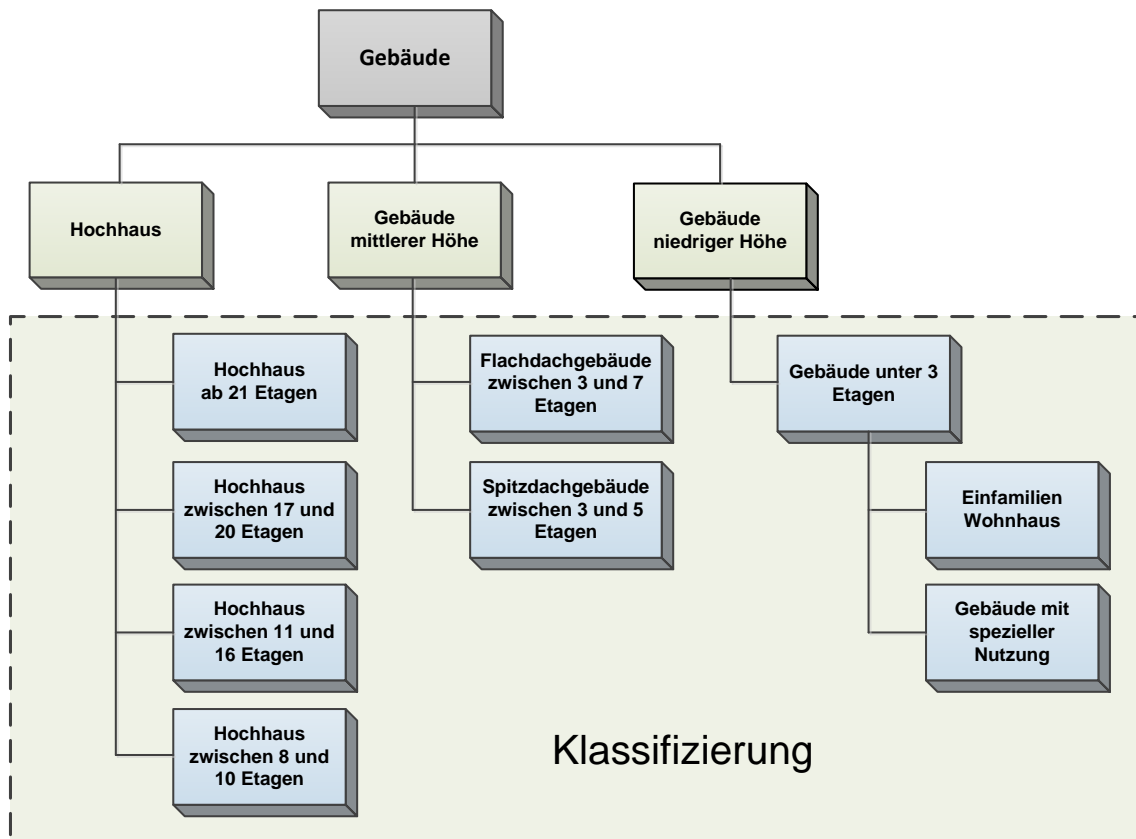


Abb. 5.3 Definition der Gebäudeklassen.

Die Klassen (Tab. 5.1 und Abb. 5.3) sind so strukturiert, dass sie innerhalb ihrer eigenen Klassendefinition Gebäudestrukturen abdecken, die im architektonischen Stadtbild für eine eigene Gruppe stehen, die sich logisch von einer anderen abgrenzt. So ist die Klasse „*Hochhaus ab 21 Etagen*“ im östlichen Teil der Stadt aus der Plattenbauserie WHH GT 18/21, deren Höhe immer baugleich ist (64 m), entstanden (BBSR, 2014d: 1f.). Die Klasse markiert die höchste Klasse und ist zwischen 60 und 91 m angelegt. Ein Beispiel zeigt die Abb. 5.4 A. Die Grenze ist für den Fall der Stadt Berlin nach oben nicht offen, da z.B. das größte bewohnbare Haus in Berlin, das Wohnhochhaus Ideal in der Gropiusstadt mit 90,85 m ist (WIKIPEDIA, 2015b). Somit werden darüber liegende Gebäude, denen kein Wohnnutzen zukommt, nicht klassifiziert. (Für eine Verallgemeinerung auf Anwendungen in anderen Städten kann die maximale Wohnhaushöhe leicht angepasst werden.) Weiterhin besteht die Plattenbauserie WHH GT 18/21 i.d.R. jeweils aus einem 18-etagigem und einem 21-etagigem Hochhauskomplex. Diese sind zwar optisch und räumlich miteinander verknüpft, sind aber dennoch unabhängige Gebäudeeinheiten. Da ebenfalls 18-etagige einzeln stehende Hochhäuser (WHH GT 18, WHH 17, WHH GT 84/85) unterschiedlicher Bauserien ohne räumliche Nähe zu den 21-etagigen im Untersuchungsgebiet I häufig auftreten, ist hier eine Abgrenzung gemacht worden. Daraus ist die Klasse „*Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen*“ entstanden (siehe Beispiel in Abb. 5.4 B).

Die Klasse „*Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen*“ ist gebildet worden, um eine Schnittstelle zwischen Wohnhochhäusern und den Plattenbautypen bis hin zu 10 Etagen zu bilden (Beispiel in Abb. 5.4 C). Sie deckt sowohl Plattenbauten des Typ PH16 (BBR, 1993: 23) als auch P2/11 ab. Da vor allem der Plattenbautyp P2/11 als elfgeschossiger Gebäudekomplex in Berlin-Ost ein prägendes Stadtbild zeichnet und sich teilweise auch in seiner Form von den weit verbreiteten rechteckigen Wohnblöcken abgrenzt, wurde diese Klasse auch im Hinblick auf die Attraktivität des

Wohnstandortes von der Klasse „Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen“ abgegrenzt. Letztere deckt zwar lediglich drei Etagen ab, ist jedoch als P2/8 (8-etagig) und P2/10 (10-etagig) häufig gebaut worden. Die Abb. 5.4 C im zeigt, dass die umgebenen 11-geschossigen Häuserblöcke eine ganz andere Form und Ausdehnung besitzen als die rechteckigen Zehngeschosser in der Mitte des Bildes (roter Kreis). Eine Unterscheidung dieser Klassen ist also trotz der geringen Höhenvariation von Zehn- zu Elfgeschossern für eine Attraktivitätsbeurteilung durchaus sinnvoll.

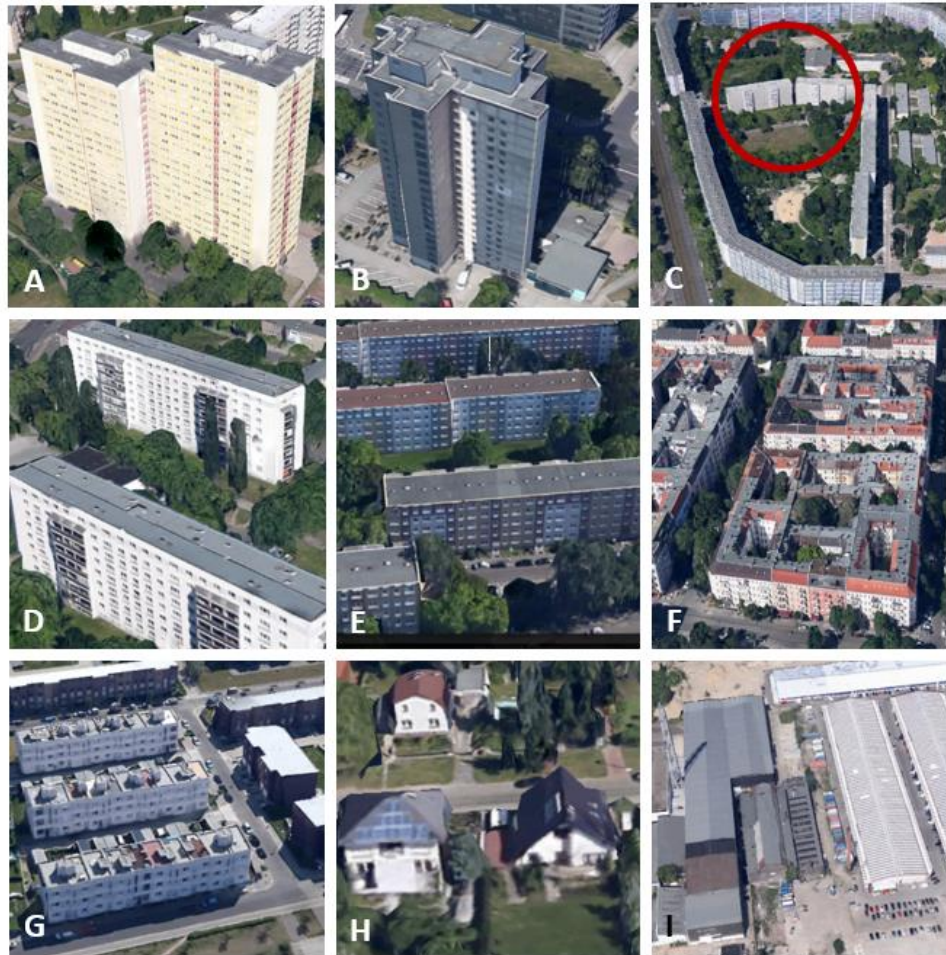


Abb. 5.4 Beispiele von typischen Gebäuden der in Tab. 5.1 und Abb. 5.3 definierten Klassen aus dem Untersuchungsgebiet I (Quelle: Google Earth).

Ebenfalls bildet diese Klasse zwischen 8 bis 10 Etagen die Abgrenzung zwischen Hochhäusern und Gebäuden mittlerer Höhe (siehe Beispiel Abb. 5.4 D). Diese Grenze verläuft bei 25 m. Jedoch gilt ein Gebäude baurechtlich in Deutschland dann als ein Hochhaus, wenn die Fußbodenebene des letzten bewohnten Geschosses bzw. des letzten Aufenthaltsraumes eines Gebäudes sich in einer Höhe von mehr als 22 m über der Geländeoberfläche nach Teil 1, § 2, Abs. 3 der Bauordnung für Berlin (BAURECHT, 2001) befindet. Diese Höhe ist mit dem vorliegenden Fernerkundungsdatensatz nicht zu ermitteln, da die Draufsicht auf ein Dach keinen Einblick auf die Fußbodenhöhe des letzten bewohnten Geschosses eines Gebäudes gewährt. Besonders Altbauten mit höheren Dachaufbauten (Dachstuhl und Schornsteine) haben im Vergleich zu Gebäuden mit Flachdach bei gleicher Gebäudehöhe unterschiedliche Etagengrenzen. Demnach kann die Definition nach der BauO Bln nicht genutzt werden. Eine iterative Versuchsreihe hat den optimalen Grenzwert von 25 m Gebäudehöhe ergeben.

Die Gebäude der mittleren Höhe unterteilen sich nach den Klassen: „*Flachdachgebäude zwischen 3 bis 7 Etagen*“ und „*Spitzdachgebäude zwischen 3 bis 5 Etagen*“. Sie sind in derselben Höhe zwischen 13 und 25 m angesiedelt und unterscheiden sich durch ihre Dachneigung (siehe Beispiel in Abb. 5.4 E, F, respektive). Somit ergeben sich unterschiedliche Geschosshöhen, da die Flachdachgebäude für Neubauten/Plattenbauten mit einer Geschosshöhe von 3 m stehen, während die Spitzdachgebäude für Altbauten und Gründerzeithäuser mit einer Geschosshöhe von 4 m stehen (BAUNETZ WISSEN, 2015). Daraus ergibt sich bei Spitzdachgebäuden die Etagenanzahl von 3 bis 5, inklusive der charakteristischen schrägen Dächer und Aufbauten. Bei den Flachdachgebäuden hingegen führt die Berechnung mit 3 m pro Etage zwar bei 3 Etagen zu schlechten Übereinstimmungen mit der Klassenzuordnung und könnte nach dieser Formel sogar noch knapp 8 Etagen ohne größere Dachaufbauten beinhalten. Das stellt aber einen notwendigen Kompromiss dar um im Gegenzug dazu, die Spitzdachgebäude besser extrahieren zu können. Für die Fragestellung der Arbeit nach Attraktivitätskriterien für die Wohnstandortwahl ist die Unterscheidung beider Typen wichtig.

Die Gebäude niedriger Höhe bestehen aus den Klassen: „*Gebäude unter 3 Etagen*“, „*Einfamilienwohnhaus*“ und „*Gebäude mit spezieller Nutzung*“. Alle sind unterhalb von 13 m definiert und unterscheiden sich nach ihrer Flächengröße (siehe Beispiel Abb. 5.4 G). Während sich das „*Einfamilienwohnhaus*“ noch selbst erklärt (siehe Beispiel Abb. 5.4 H), sei an dieser Stelle vermerkt, dass die Klasse „*Gebäude mit spezieller Nutzung*“ als einzige den Wohnnutzen komplett ausschließt und stellvertretend für Industrie- und Gewerbenutzung steht (siehe Beispiel Abb. 5.4 I). Da es keine genauen Definitionen gibt, ab welcher Fläche sowohl Industrie- und Gewerbenutzung als auch Einfamilienwohnhäuser als solche deklariert werden, wurden diese Werte durch Versuchsreihen ermittelt, bis ein optimales Ergebnis gefunden wurde. Demnach wurden „*Einfamilienwohnhäuser*“ mit einer Fläche von unter 300 m² und „*Gebäude mit spezieller Nutzung*“ ab einer Fläche über 5000 m² angenommen.

Diskussion der Gebäudeklassen

Die Komplexität der Gebäudehierarchisierung nach Geschosshöhen und deren Höhe besteht darin, dass die jeweiligen Dachaufbauten wie Spitzdächer, Schornsteine oder Fahrstuhlaufbauten mit einbezogen werden müssen. Diese sind jedoch in Abhängigkeit von dem jeweiligen Gebäudetyp (Altbau, Neubau, Gartenlaube) sehr unterschiedlich. Weiterhin ist die Höhe der Geschosse, wie oben erwähnt, je nach Bauart variabel. Eine mathematische Herleitung ist somit nicht möglich. Für eine hinreichende Lösung müssen Grenzwerte der Höhen für die jeweiligen Gebäudetypen definiert werden. Diese können nicht für jedes Gebäude ideal angepasst sein, da die Anzahl der unterschiedlichen Architekturen in einem Untersuchungsgebiet wie Berlin groß ist. Um dennoch eine genügende Anzahl an Klassen zu extrahieren, die die Unterschiedlichkeiten der morphologischen Gebäudestrukturen widerspiegeln, wurden 9 Klassen gebildet, die sich nach der Höhe der Objekte und den geschätzten Geschosshöhen hin ableiten (siehe Tab. 5.1 und Abb. 5.3). Die jeweiligen Höhenzuordnungen der Gebäudeklassen zur Geschosshöhe erscheinen nicht immer konsistent. Das ist darin begründet, dass sowohl bei den Höhenwerten, als auch bei der Anzahl der Geschosse alle Zwischenwerte abgedeckt sein müssen. So kann beispielsweise ein Gebäude mit einer Höhe von 31,9 m, 8 bis 10 Etagen beinhalten, ein Gebäude mit einer Höhe von 32 m hingegen schon 11 bis 16 Etagen (siehe Tab. 5.1). Die Klassenzuordnung nach der Geschosshöhe ist daher nur in Kombination mit den eigentlichen Höhenmaßen von Nutzen.

Weiterhin konnte keine einheitliche Höhenabstufung an den Grenzen der jeweiligen Klassen genutzt werden. Ein einfaches mathematisches Beispiel belegt das. Die Klasse „Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen“ wird zwischen 53 und 60 m eingeordnet. Bei der Annahme, dass jede Etage, Erdgeschoss mit inbegriffen mit 3 Metern berechnet wird, wären die tatsächliche Höhenzuordnung bei 51 bis 60 m anzusetzen. Visuelle Analysen haben jedoch gezeigt, dass eine störungsfreie Klassifikation mit angenommenen 53 m für 17 Etagen zu besseren Ergebnissen führt. Dies begründet sich durch diverse Dachaufbauten und leichte Höhenvariationen. Die sich nach unten hin anschließende Klasse „Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen“ hingegen ist zwischen 32 bis 53 Metern definiert. Rechnerisch müsste sie bei angenommenen 3 m pro Etage aber zwischen 33 bis 48 m liegen. Somit entsteht eine Lücke von 5 Metern zwischen der 16ten und 17ten Etage. Weiterhin ist die 11te Etage mit 32 Metern einen Meter zu klein bemessen. Die naheliegende Lösung wäre es nun entweder die Klasse „Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen“ auf 10 bis 17 Etagen einzustufen, was einer Höhe von 30 bis 51 m entspräche und mit hypothetisch angenommenen Aufbauten von 2 m Höhe genau der Einteilung von 32 bis 53 m entsprechen würde, die in der Klassenhierarchie festgelegt wurde. Die darunterliegende Klasse „Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen“ müsste an dieser Stelle jedoch ebenfalls auf 9 Etagen verkleinert werden. Bei einer Höhenzuordnung von 25 bis 32 m für die Klasse „Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen“, würden 9 Etagen, bei nach wie vor angenommenen 3 m Geschosshöhe, jedoch 27 m Gebäudehöhe ausmachen. Somit würde eine 5 m Lücke zwischen der 9ten und 10ten Etage entstehen. Eine Zusammenfassung der Klassen „Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen“ und „Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen“ zu der Klasse „Hochhaus zwischen 8 bis 17 Etagen“ könnte eine Lösung darstellen. Einerseits ist die Trennung der beiden Klassen sinnvoll, andererseits würde sich diese Klasse dann über 9 Etagen erstrecken. Dies ist im Vergleich zu den anderen Klassen überproportioniert, weshalb von einer Fusion der beiden Klassen abgesehen wurde. Die Klassifizierung wäre an dieser Stelle zu grob ausgefallen da die typischen Unterschiede der Plattenbaublöcke der DDR vorwiegend in den häufig vorkommenden Etagen 8, 10 und 11 nicht mehr heraus zu kristallisieren gewesen wäre. Die Probleme in der Klassenzuordnung setzten sich über alle Klassen fort, da es für die Fragestellung keine einheitliche und öffentlich zugängliche Gebäudehierarchisierung gibt.

Die Klassen wurden so gebildet, dass sie eine bestmögliche Abdeckung der unterschiedlichen Gebäudetypen widerspiegeln und umfassend auf das Berliner Stadtgebiet anwendbar sind. Somit lassen sich aus der Typisierung der Gebäudestrukturen erste Ableitungen der Attraktivität von Wohnstandorten hin treffen. Es konnte gezeigt werden, dass für eine fundierte Aussage über den Gebäudetyp immer beide Werte betrachtet werden müssen. Die definierte Klassenzuordnung resultiert in einer guten Korrelation der Etagenanzahl mit der Gebäudehöhe. Damit bietet diese Klasseneinteilung eine optimale Grundlage für die sich anschließende OBIA.

5.2 Workflow

Die Abb. 5.5 veranschaulicht den Workflow der automatisierten OBIA zur Extraktion und Typisierung von Gebäudeobjekten und deren Umfeld Parametern.

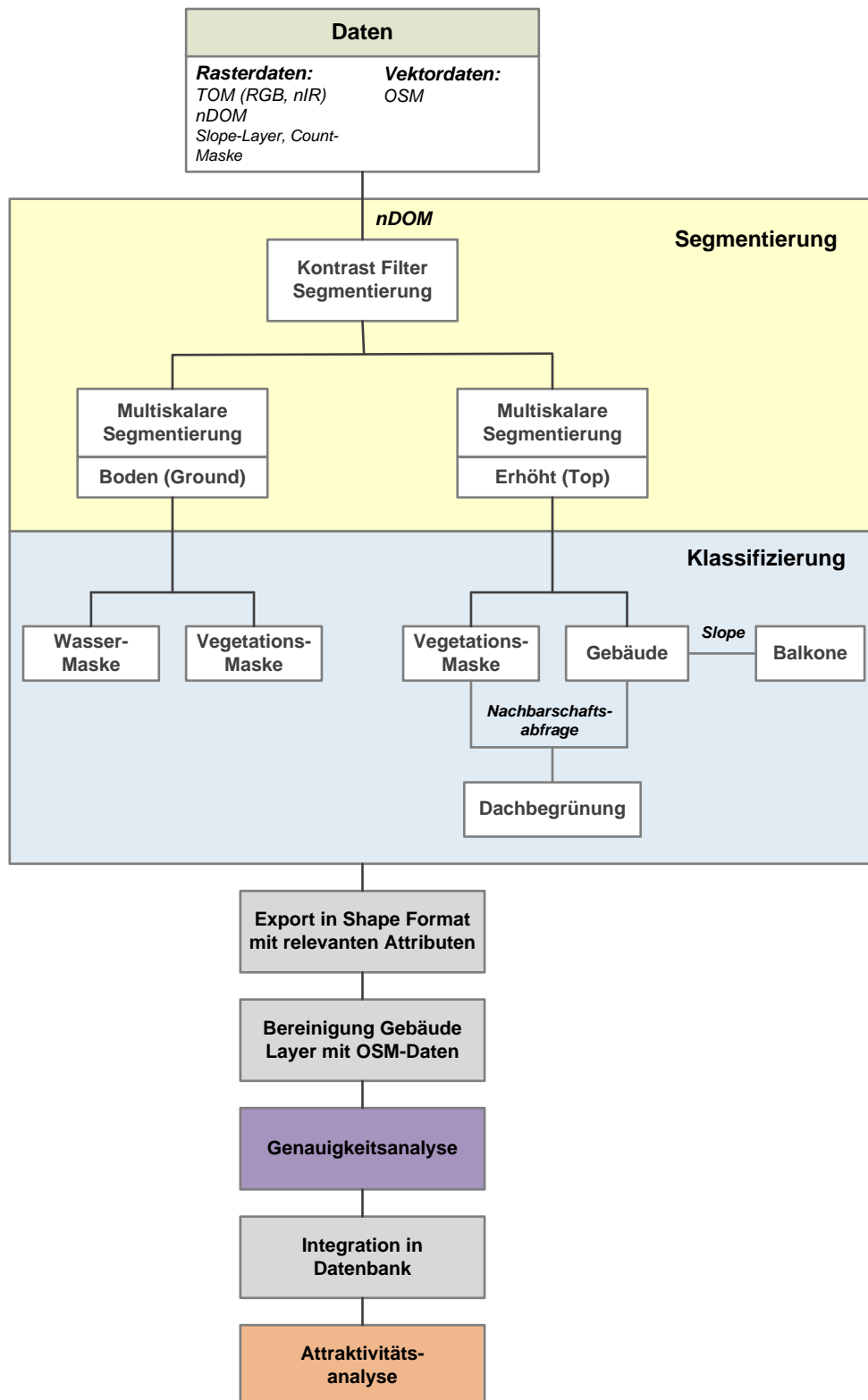


Abb. 5.5 Workflow der Segmentierung zur Klassifizierung.

Die Eingangsdaten werden im ersten Arbeitsschritt segmentiert und anhand ihrer Höhe in zwei Ebenen unterteilt. Die eine Segmentierung zielt auf bodennahe Objekte ab, die andere auf erhöhte. Damit wird eine umfassende Klassifizierung von einerseits bodennaher Vegetation und Wasserkörpern (*Ground*) und andererseits von erhöhten Vegetationsobjekten, Gebäuden und deren gebäudegestalterischen Elementen wie Balkonen und Dachbegrünung (*Top*) ermöglicht. Anschließend werden die extrahierten Objekte vektoriell als Shape-Datei mit relevanten geometrischen Attributen exportiert. Dies ermöglicht die Weiterverarbeitung in einem GIS. Mittels OSM-Vektoren werden fehlklassifizierte Gebäudestrukturen entfernt und die Daten für eine Genauigkeitsanalyse vorbereitet. Diese validiert zum einen die Güte der klassifizierten Objekte mittels Accuracy Assessment und vergleicht zusätzlich wie gut die klassifizierten Gebäudestrukturen mit den in der ALK verzeichneten zusammenpassen. Schlussendlich werden die Shape-Dateien in eine *Geodatabase*, also in eine Geodatenbank integriert. Mit den extrahierten Daten kann im Folgenden eine Attraktivitätsanalyse der Wohnstandorte erfolgen. Sowohl die automatisierte Prozesskette der OBIA als auch die Prozesskette zur Bereinigung und Vorbereitung der Daten auf die Genauigkeitsanalyse sind digital beigefügt. Weiterhin ist der komplette Ablauf der OBIA dem Anhang 7.B zu entnehmen.

5.3 Segmentierungsprozesse

Die Verfügbarkeit sehr hochauflösender Fernerkundungsdaten wie die der der UCX begünstigen die Nachfrage und Entwicklung von Verfahren zur automatisierten Gewinnung von Informationen. Diese Aufgabe erweist sich jedoch in dicht bebauten urbanen Gebieten als sehr komplex, da die zu klassifizierenden Strukturen ein hohes Maß an Heterogenität aufweisen können. Gegenüber Daten geringerer räumlicher Auflösung wie Satellitenbilddaten erlauben es die sehr hochaufgelösten Luftbilder einerseits, die verschiedenartigen Strukturen in urbanen Arealen zufriedenstellend zu analysieren und Informationen zu extrahieren. Andererseits jedoch resultieren aus der hohen Auflösung auch Probleme, die sich gerade aus der hohen strukturelle-räumlichen Heterogenität im städtischen Gebiet ergeben. Das sind zum einen die großen Datenmengen, die anfallen. Das macht es erforderlich, angepasste Methoden für eine großflächige Bearbeitung anzuwenden, da sich ansonsten der Rechen- bzw. Zeitaufwand stark erhöhen kann. Weiterhin ist durch die hohe Varianz der Objekte eine stabile Klassendefinition erforderlich. Der Extraktionsregelsatz der vorliegenden ist auf das Berliner Stadtgebiet hin angepasst. Jedoch sind die Klassendefinitionen so gewählt, dass eine Übertragbarkeit auf andere urbane Gebiete möglich ist. Im Falle einer Anwendung für Gebiete mit sogenannten Wolkenkratzern (*Skyscrapern*) oder anderen regional unüblichen Gebäudetypen müsste die Regelkette jedoch angepasst werden.

Bei der Klassifikation von Objekten ist entscheidend, die Verfahrensauswahl entsprechend der Fragestellung zu definieren D.h. welche Objekteigenschaft soll in welcher Auflösung und in welchem Gebiet extrahiert werden. Beispielsweise ist für die Bestimmung der Fläche von Forstgebieten aus Satellitenbilddaten, ohne Betrachtung der Einzelbäume, ein pixelbasierter Klassifizierungsansatz anwendbar, da dieser einfach und schnell funktioniert und lediglich die Waldfläche als Information extrahiert werden soll. Für eine urbane Anwendung mit sehr hochauflösenden Daten ist diese Methode jedoch ungeeignet, da die zu klassifizierenden Pixel viel kleiner sind als die Objekte, die sie repräsentieren. Die objektbasierte Klassifizierung erweist sich hingegen als geeignet wenn sehr hochauflösende Daten für urbane Anwendungen zur Verfügung stehen. Bei der objektbasierten Analyse werden einzelne Objekte in ihrem Kontext untersucht

und neben den spektralen Eigenschaften auch die Form, Textur sowie die Nachbarschaftsbeziehungen zueinander berücksichtigt. Diese Informationen sind aus einem Pixel alleine nicht ableitbar. Das objektbasierte Verfahren versucht, die menschliche Wahrnehmung zu modellieren. Dafür werden nicht die einzelnen Bildelemente, also Pixel, sondern Segmente, die aus mehreren Pixeln bestehen als Grundlage für die Klassifizierung verwendet (POZNANSKA & BAYER, 2014: 26).

In Kapitel 4.1 wurden bereits ausführlich weitere Segmentierungsverfahren vorgestellt. Für die Fragestellung dieser Arbeit und die sehr hochauflösende Datengrundlage wurde ein objektbasierter Ansatz gewählt, dessen Durchführung im Weiteren ausführlich erläutert wird. Dem Kapitel 4.1.6 sind die genauen Funktionsweisen der verwendeten Segmentierungsalgorithmen der Software eCognition zu entnehmen. An dieser Stelle wird auf die Einstellungen der Segmentierungsalgorithmen eingegangen.

5.3.1 Kontrast Filter Segmentierung

Der erste Schritt in dem Extraktionsregelsatz der OBIA ist die Kontrast Filter Segmentierung. Dieser Segmentierungsalgorithmus unterteilt die Bildobjekte in helle und dunkle Regionen und läuft ausschließlich auf dem nDOM ab. Dies ist für die Erfassung von Höhenstrukturen von Bedeutung, da das nDOM in Grauwerten zwischen hell und dunkel unterteilt ist. Somit lassen sich z.B. klare Abtrennungen von Gebäudestrukturen (hell) und Bodenobjekten (dunkel) realisieren. Zuerst führt der Algorithmus eine *Chessboard Segmentation* durch, also die Unterteilung des gesamten Bildes in gleichgroße quadratische Segmente. Die Größe dieser quadratischen Segmente ist variabel und hat den Wert 1.000 als Grundeinstellung. Aufgrund der Ausdehnung der Untersuchungsgebiete wurde dieser Wert auf 10.000 erhöht, um die Anzahl der Quadrate nicht optimieren. Weitere wichtige Parameter sind der minimale Schwellwert, welcher die unterste berücksichtigte Grenze für die Teilung der Segmente bildet und der maximale Schwellwert, der die oberste Grenze definiert. Durch das Herabsenken des Wertes werden in erster Linie nur die weichen Kontrastsprünge zwischen den Objekten segmentiert. Somit wird auch verhindert, dass bodennahe Objekte wie Einfamilienhäuser fälschlicherweise dem Boden zugeordnet werden. Ein zu hoher maximaler Schwellwert führt dazu, dass die Kontrastsprünge zu grob sind und Objekte an Höhenstufen geteilt werden an denen sie nicht geteilt werden sollten. Daher wurde der voreingestellte Wert für den minimalen Schwellwert, der bei 0 liegt nicht verändert. Der maximale Schwellwert wurde von 255 auf den Wert 2 verändert, um möglichst viele Höhenstufen abzudecken und zu verhindern, dass die Grenzen an den Objekten zu starken Kontrastsprüngen unterliegen. Somit werden möglichst viele Graustufen in die Segmentierung eingebunden. Abschließend werden die dunklen und hellen Segmente in die Klasse der hellen (Tops) und die Klasse der dunklen Objekte (*Ground*) überführt. Das Ergebnis liefert ein segmentiertes Bild, in dem Bodenobjekte von erhöhten Objekten klar abgetrennt werden.

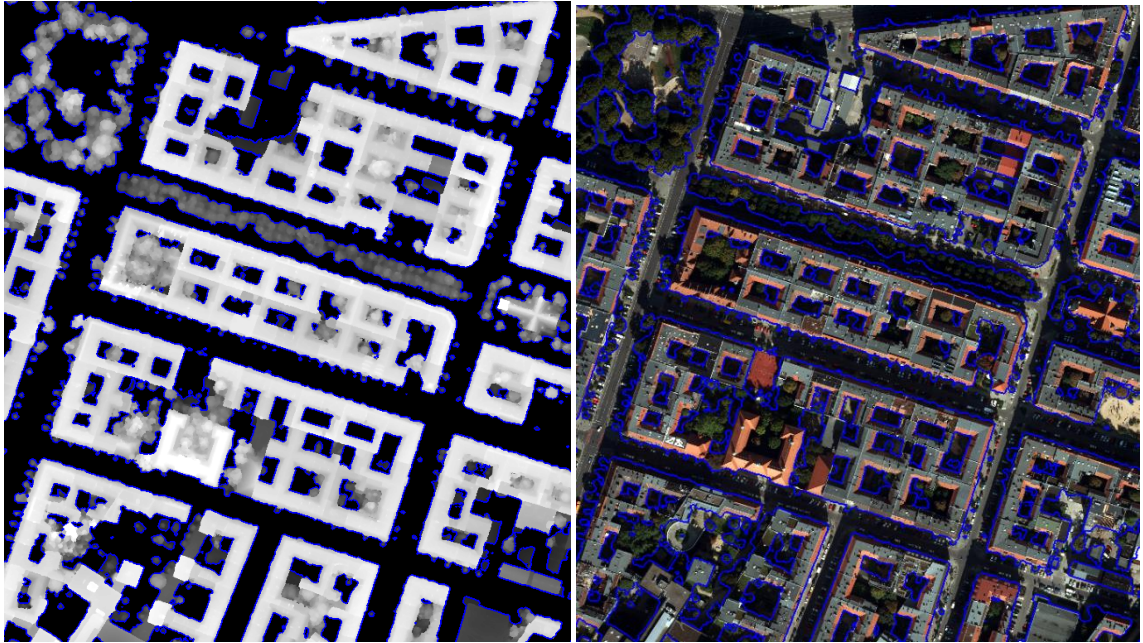


Abb. 5.6 Kontrast Filter Segmentierung: links nDOM, rechts RGB.

Die Abb. 5.6 zeigt auf der linken Seite anhand eines Ausschnittes im Untersuchungsgebiet I, wie der Algorithmus die Segmente zwischen den hellen und dunklen Flächen (blaue Linie) teilt. Die rechte Abbildung zeigt das Ergebnis in der RGB Darstellung. Die Resultate aus dieser Segmentierung bilden die Grundlage für die anschließende *Multiskalare Segmentierung*.

5.3.2 Multiskalare Segmentierung

Das nun zweigeteilte Bild, bestehend aus den Klassen *Top* und *Ground*, wird im nächsten Schritt einer feineren Segmentierung unterzogen. Die Klasse *Top* wird benötigt, um alle erhöhten Objekte wie Bäume und Gebäude zu extrahieren. Die Klasse *Ground* ist zusätzlich hinzugezogen worden, um bodennahe Vegetation und Wasserkörper zu extrahieren. Für diesen Zweck kommt die *Multiskalare Segmentierung* zum Einsatz. Dieses *Region-Merging* Verfahren fasst benachbarte Pixel nach bestimmten Homogenitätskriterien zusammen. Da alle Segmente simultan wachsen, haben sie ähnliche Größen und sind dadurch vergleichbar. Die Größe und Form der Segmente ist vom Benutzer veränderbar. Dies ist zum einen durch eine Gewichtung der eingehenden Layer möglich. Die Klasse *Top* erhält die maximale Gewichtung von 1 auf das nDOM, um die Segmente anhand ihrer Höhenstufen klar voneinander zu unterscheiden. Dies begünstigt maßgeblich die Extraktion von Gebäudestrukturen, da diese in urbanen Gebieten eine starke Diversität in der Höhe aufweisen. Weiterhin ist das nIR mit 0,2 leicht gewichtet, um die Extraktion von Dachbegrünung und erhöhter Vegetation zu begünstigen. Alle anderen Eingangslayer werden nicht, also mit 0 gewertet. Die zweite Klasse *Ground* hingegen erhält eine maximale Gewichtung von 1 auf das nIR und 0,2 auf den roten Kanal des RGB, um eine optimale Vegetationsextraktion zu ermöglichen. Da diese Klasse keinerlei Höheninformationen enthält, entfällt eine Gewichtung des nDOM. Die maximal zulässige Heterogenität innerhalb der Segmente (*Scale Parameter*) sowie eine Festlegung bestimmter Homogenitätskriterien (*Color & Shape* und *Smoothness & Compactness*) kann ebenfalls für die Beeinflussung der Größe und Form der Segmente hinzugezogen werden. Diese Parameter sind in der folgenden Abb. 5.7 dargestellt

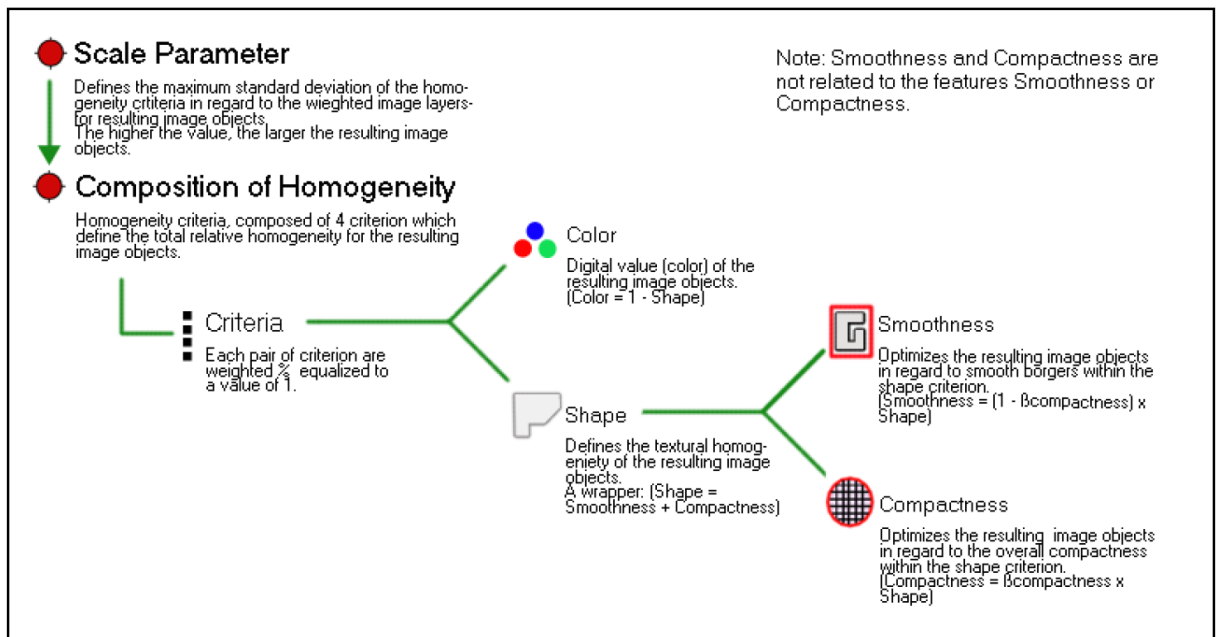


Abb. 5.7 Segmentierungsparameter für die Multiskalare Segmentierung in eCognition (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 70).

Für die Klasse *Top* wurde ein *Scale Parameter* von 250 festgelegt. Versuchsreihen an kleineren Teilausschnitten haben diesen Wert als optimal identifiziert. Einerseits führt ein niedrigerer Wert dazu, dass zu viele feine Segmente entstehen die die Extraktionsgenauigkeit der Objekte zwar verbessert, jedoch zu einem starken Anstieg der Rechen- und Bearbeitungszeit führt. Andererseits führt ein zu hoher Wert dazu die Objekte gröber und größer werden zu lassen. Dies spart zwar Rechenleistung, führt aber zu ungenaueren Objektextraktionen. Die richtige Einstellung ist daher in Abhängigkeit von dem zu extrahierenden Objekt und der gewünschten Genauigkeit anzupassen. Die Klasse *Ground* ist lediglich für die Detektion von bodennaher Vegetation und Wasserkörpern zusätzlich segmentiert. Daher hat sich ein *Scale Parameter* von 1.000 als ausreichend herausgestellt.

Die Homogenitätskriterien gleichen sich gegenseitig zu dem Wert 1 aus. Wenn also ein Wert auf 0,6 steht, beträgt der andere automatisch 0,4. Das Kriterium für *Color* beeinflusst die Struktur der Objektgrenzen, da alle spektralen Werte berücksichtigt werden. Somit gehen stärker strukturierte Grenzen hervor. Die Formhomogenität wird vom Kriterium *Shape* definiert. Bei einer höheren Gewichtung werden entsprechend der Heterogenität der Daten größere Segmente gebildet. Es empfiehlt sich, einen höheren Wert für *Shape* zu verwenden, wenn klare, nicht fraktale Segmentgrenzen, wie z.B. bei der Segmentierung von Gebäudedächern erfasst werden sollen. Für die Segmentierung von Vegetation bietet sich ein höherer Wert für *Color* an, da spektrale Feinheiten somit besser erfasst werden können (POSZNANSKA & BAYER: 37).

Zusätzlich lässt sich für das Kriterium *Shape* die Form der Segmente beeinflussen. Die Parameter *Smoothness* und *Compactness* definieren wie glatt das Segment, oder wie hoch dessen Kompaktheit sein soll. Für die Klasse *Top* und der vorrangigen Fragestellung der Gebäudetypisierung wurde *Shape* auf 0,6 und die *Compactness* auf 0,8 gesetzt, um klare Segmentgrenzen an Dachkanten zu ermöglichen. Da jedoch auch Dachbegrünung und erhöhte Vegetation eine wichtige Rolle spielen, wurde der Wert von *Shape* nicht zusätzlich weiter angehoben. Die Klasse *Ground* wurde hingegen mit einer niedrigen Gewichtung auf *Shape* von 0,2 und einer damit einhergehenden Gewichtung von 0,8 auf *Color* versehen. Ebenfalls spielt das

Kriterium der *Compactness* eine untergeordnete Rolle und wurde auf 0,2 eingestellt. Dies ist darin begründet, dass nur Wasser- und Vegetationselemente in dieser extrahiert werden. Die Abb. 5.8 zeigt das Segmentierungsergebnis der *Multiskalaren Segmentierung* auf der Grundlage der vorab durchgeführten *Kontrast Filter Segmentierung*. Die Klasse *Top* ist in weiß dargestellt, die Klasse *Ground* in schwarz.



Abb. 5.8 Segmentierungsergebnis der multiskalaren Segmentierung im Untersuchungsgebiet I.

Zur Verbesserung der Bestimmung der Gebäudeumrisse besteht die Möglichkeit, thematische Layer in die Segmentierung einzubinden. Da jedoch eine Extraktion ohne Zuhilfenahme von zusätzlichen Vektordaten den eigentlichen Mehrwert dieser Arbeit darstellt, wurden die vorhandenen ALK-Daten nicht eingebunden. Weiterhin ist zu erwähnen, dass eine Einbindung zwar sehr genaue Segmente an Gebäudeobjekten ohne Dachüberstand liefert, jedoch bei überstehenden Dächern diese Zusatzinformationen abgeschnitten werden, da die ALK-Daten nur die Grundrissinformationen der Gebäudeobjekte beinhaltet, jedoch nicht die der Dachflächen. Da die Draufsicht keinen Einblick auf die tatsächliche Grundrissfläche ermöglicht, kann es aus diesem Grund zu Fehlern in der Analyse kommen. Das ist in Abb. 6.6 und 6.8 in dem Kapitel 6 deutlich beschrieben. Jedoch besteht durch eben diese Draufsicht die Möglichkeit, Dachobjekte wie Schornsteine, Terrassen, oder Balkone zu identifizieren. Diese Merkmale können für die Bestimmung von Attraktivitätsmerkmalen von Interesse sein. Wegen der Größe der Untersuchungsgebiete und dem Anspruch eines automatisierten Verfahrens wurde hier jedoch auf eine Extraktion von Dachaufbauten verzichtet. Lediglich Balkone konnten für einige bestimmte Klassen analysiert werden. Für ein kleineres Untersuchungsgebiet mit weniger differenzierbaren Klassen, wäre eine Abänderung der Extraktionsregelkette möglich, würde jedoch für die gesamten Fläche einer Großstadt wie Berlin zu ungenaueren Ergebnissen führen, weil filigrane Strukturen wie Schornsteine u.a. Dachaufbauten ein hohes Maß an Heterogenität aufweisen. Daher würden zu viele unterschiedliche Klassen auf einem Gebäudeobjekt extrahiert werden, was zu sehr unübersichtlichen Ergebnissen führt. Eine einzelne Gebäudeklasse könnte demnach als "durchlöchert" extrahiert werden.

5.4 Klassifizierungsprozesse

Die Klassifizierung der Gebäudestrukturen geht von der Annahme aus, dass alle Objekte, die nicht der Vegetation zugeordnet werden können und ein Mindestmaß an Höhe besitzen, nichts anderes als Gebäudestrukturen sein können. Spektrale Eigenschaften können bei der Analyse von Luftbilddaten genutzt werden, um **Vegetation** zu erkennen und deren Vitalität zu untersuchen. Ein besonders herausstechendes Merkmal der Vegetation ist die markante Vegetationskante, die für Vegetationsgebiete zu einem deutlichen Anstieg des Reflexionsvermögens oberhalb von 700 nm führt. Sie bietet eine Möglichkeit, den Vegetationsindex zu bestimmen. Der erste Schritt der Klassifikation ist deshalb die Berechnung eines Vegetationsindizes. In diesem Fall wurde auf den NDVI, den normierten Differenzvegetationsindex NDVI (*Normalized Differenced Vegetation Index*, 5-1) zurückgegriffen. Man berechnet ihn aus den Reflexionswerten im nahen Infrarotbereich (*nIR*) und den Werten des roten, sichtbaren Spektralkanals (*R*, etwa 620 – 700 nm). Der NDVI hat einen Wertebereich zwischen - 1 und 1 (SABINS, 1997: 405):

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (5-1)$$

Je höher der NDVI-Wert eines Pixels, umso größer ist der vitale Vegetationsanteil. Mithilfe des NDVI können Vegetationsflächen von anderen Arealen unterschieden werden. Ausgehend von der Annahme, dass ein Gebäude ab einer Höhe von 2,8 m über dem Boden als solches definiert wird (siehe Kapitel 5.1, Definition der Gebäudeklassen), ergibt sich daraus die erste Selektion. Diese geht weiterhin von dem iterativ ermittelten NDVI-Wert von unter 0,15 für alle nichtvegetativen Klassen aus. Daraus folgt, dass alles, was über dem NDVI-Wert von 0,15 liegt, der Klasse Vegetation zugeordnet werden kann. Eine zusammenhängende Vegetationsmaske ist jedoch nicht ausreichend um Vegetationsunterschiede für urbanes Wohnen zu charakterisieren. Für die Unterscheidung unterschiedlicher Vegetationstypen muss die Klassifizierung verfeinert werden. Da sich aus unterschiedlichen Höhenstufen des nDOM ableiten lässt, ob die Vegetation erhöht oder bodennah ist, muss an dieser Stelle eine Untergliederung in bodennahe Vegetation und erhöhte Vegetation erfolgen. Dabei wird von der Vermutung ausgegangen, dass ein Vegetationsobjekt ab 3 Metern Höhe ein Baum ist. Alle anderen Vegetationsflächen unter 3 Metern sind dann also Hecken, Wiesen, Rasen usw. So ist eine klare Unterscheidung von Bäumen, bzw. Waldflächen und Hecken- und Rasenflächen möglich.

Dies ist eine wichtige Information, da ein Baum einen anderen Nutzen und eine andere ästhetische Wirkung erzielt als ein gleichgroßes Stück Rasenfläche. So ist eine Wiese beispielsweise für Freizeitaktivitäten (Sport und Spiel) nutzbar, während ein Baum im Sommer z.B. ein Schattenspender sein kann, der auch einen großen Einfluss auf das städtische Klima hat. Eine Erschwernis bei der Nutzung zentralperspektivischer Fernerkundungsdaten ist der Umstand, dass der Blick unter ein erhöhtes Objekt wie ein Baum nicht möglich sein kann. Ein Baum kann die unter ihm liegende Wiese oder andere Objekte wie Gebäude ganz oder zum Teil verdecken. Daher ist die extrahierte Fläche der bodennahen Vegetation nur bedingt aussagekräftig über die tatsächlich vorhandene Fläche. Ein weiteres Phänomen, das für die urbane Klassifikation beachtet werden muss, betrifft die **Dachbegrünung** als erhöhte Vegetation. Sie muss gesondert betrachtet werden und von der Klasse der erhöhten Vegetation separiert werden. Anderenfalls würde ein Gebäude mit Dachbegrünung als ein Baum identifiziert werden und sein tatsächlicher Nutzen wäre nicht mehr zuordenbar. Die Extraktion der Dachbegrünung erfolgt deshalb über den Prozess

der gesamten Gebäudeklassifikation hinweg und wird erst am Ende dieser abgeschlossen. Daher wird diese Klasse am Ende der Klassifikation der Gebäudeobjekte nochmals beschrieben. Nach der Klassifizierung der Vegetation wird diese einem *merge*, also einer Vereinigung zusammengehöriger Objekte unterzogen, um die Anzahl an Polygonen und deren Informationen zu beschränken und damit sowohl Speicherplatz als auch Rechenleistung zu sparen.

Im nächsten Schritt wurden die **Wasserkörper** extrahiert. Aufgrund der Reflexionseigenschaften von Wasserkörpern ist die Physik der Gewässerfernerkundung etwas komplexer als die Fernerkundung von Vegetation oder Boden, bei denen das Licht an der Oberfläche gestreut und absorbiert wird. An der Oberfläche von Wasserkörpern kommt es zu einer spiegelnden Reflexion der einfallenden solaren Strahlung. Sie erzeugt nur in dieser Beobachtungsgeometrie ein signifikantes Signal, während das Signal für alle andere Beobachtungsgeometrien klein ist. Daher ist die Anzahl der korrespondierenden Punkte während des Bildzuordnungsverfahrens sehr gering. Diese wurden für die Generierung des DOM in der *Count Maske* gespeichert. Nicht zugeordnete Bereiche erhalten den Wert Null und ermöglichen damit die Identifikation von *NoData*-Arealen. Infolgedessen deutet eine sehr geringe Anzahl an *Count*-Werten darauf hin, dass sich an dieser Stelle Wasser befindet. Einige Versuchsreihen haben ergeben, dass ein *Count*-Wert zwischen 0 und 2 optimale Ergebnisse liefert, ohne Schattenflächen am Boden mit einzubeziehen. Durch einen Schleifenbefehl (*Loop*) um die relative Grenze (*relative border*) des bis dahin klassifizierten Wasserkörpers mit der noch unklassifizierten Fläche darum, konnte diese weiterhin vergrößert werden und Segmente, die außerhalb des Wertebereiches aber in direkter Nachbarschaft zum Wasser liegen, zusätzlich korrekt zugeordnet werden. Die Operation *relative border* ist eine Nachbarschaftsoperation, die das relative Ausmaß der Umschlossenheit eines Objektes im Verhältnis zu einem anderen beschreibt. Kleinste Schattenflächen werden jedoch ebenfalls durch den Schwellwert detektiert. Daher wird nach dem *merge* des Wasserkörpers, jede Fläche die unter 100 m² beträgt wieder in die Ursprungsklasse *Ground* zurück überführt. Die Methode ist sehr simpel, da in der Gewässerfernerkundung viele andere Variable eine Rolle spielen können. Da der Schwerpunkt in dieser Arbeit jedoch nicht auf der Klassifikation von Vegetation und Wasserflächen liegt, sind diese auch nur relativ einfach detektiert. Jedoch haben visuelle Analysen in den beiden Untersuchungsgebieten gezeigt, dass die Annahme der geringen *Count*-Werte korrekt ist und eine adäquate Fläche an Wasser konnte ohne eine übermäßige Fehlklassifizierung extrahiert werden.

Gebäudeklassifikation:

Da nun die wichtigsten Umfeldparameter extrahiert wurden, um Aussagen über die Attraktivität des jeweiligen Wohnstandortes zu treffen, erfolgt nun die Klassifizierung der Gebäudeobjekte. Sie wird wie in Kapitel 5.1 angesprochen der Höhe nach, hierarchisch von oben nach unten vorgenommen. Die vorab definierte Klasse „Gebäude“ dient dabei als Grundlage für die Extraktion der Gebäudeobjekte.

Die erste Klasse bilden die „Hochhäuser ab 21 Etagen“. Diese werden zuerst über ihre Höhe nach den Klassendefinitionen bestimmt. Um im Folgenden das Problem der Überklassifizierung der Gebäudeobjekte an ihren Schattenflächen zu minimieren, kommt wieder die *Count-Maske* zum Einsatz. Besonders an den über 60 m hohen Gebäudekomplexen mit nur wenigen oder keinen korrespondierenden Bildpunkten in den Schattenflächen kann es ohne diese Operation zu Fehlklassifizierungen kommen. Die Schattenflächen ohne ausreichende Werte werden interpoliert, also geschätzt und ergeben anhand der Höhe von ca. 60 m in unmittelbarer

Umgebung zum Hochhaus sehr hohe Werte im nDOM. Dies wiederum führt dazu, dass eine Fläche erfasst wird, die eigentlich auf dem Boden liegt. Im nächsten Arbeitsschritt wird erneut die *relative border* verwendet, um unklassifizierte Flächen, die durch die *Count-Maske* bereinigt wurden, wieder in die Klasse „Hochhäuser ab 21 Etagen“ zu integrieren. Dies ist notwendig, da auch Schattenflächen an Dachaufbauten wie z.B. Fahrstuhlschächten durch den Einsatz der *Count-Maske* eliminiert werden können. Eine weitere elementare Funktion ist *find enclosed by class*. Diese arbeitet ähnlich wie die *relative border*. Jedoch muss bei dieser eine hundertprozentige Umschlossenheit eines Objektes von einem anderen gegeben sein. Damit können andere Klassen, die vollständig von der Klasse „Hochhaus ab 21 Etagen“ umschlossen sind, in diese überführt werden.

Somit wird zuerst ein Objekt nach seiner Höhe erfasst und von Fehlklassifizierungen an Schattenflächen mittels *Count Maske* befreit. Durch diese Bereinigung können an Dachaufbauten unklassifizierte Flächen entstehen. Es besteht die Möglichkeit, diese nicht-detektierten Flächen durch ihre umgebende Klasse zu schließen. Das ist mit den Operationen *relative border* und *find enclosed by class* durchführbar. Am Ende wird die Klasse wieder zu einem Objekt zusammengeführt (*merge*). Gebäudeflächen innerhalb dieser Klasse die kleiner als 100 m² sind, werden in die unklassifizierte Klasse rücküberführt. Zum einen ist davon auszugehen, dass ein Gebäudekomplex, mit Ausnahme von Einfamilienwohnhäusern, nicht kleiner als 100 m² sein kann. Zum anderen wird dadurch ermöglicht, dass die unklassifizierten Klassen u.U. in den nächsten Klassen doch noch korrekt identifiziert werden können. Dies ist zweifelsohne nicht überall möglich. Als letzter Schritt wird hypothetisch angenommen, dass eine erhöhte Vegetationsfläche das Dach der jeweiligen Klasse bedeckt. Um diese in die Klasse *Dachbegrünung* zu überführen, ist es notwendig, nochmal die Funktion *find enclosed by class* anzuwenden. Alles was nun erhöhte Vegetation ist und von der jeweiligen Klasse umschlossen wird, wird automatisch in die Klasse *Dachbegrünung* überführt. Diese Vorgehensweise bleibt im Kern bei jeder Klasse dieselbe und wird daher im Weiteren auch nicht nochmal explizit erläutert. Jedoch verändert sich die Komplexität der Abfragen je tiefer man in der Klassifikationshierarchie herabsteigt.

Die sich nun anschließende Klasse „Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen“ verhält sich bis auf ein paar iterativ angepasste Parametereinstellungen genauso, wie die darüber liegende. Im Wesentlichen kommt jedoch eine neue Abfrage hinzu. Diese ist eine Distanzabfrage. Die *distance to vectors* berechnet die Entfernung zu einem Polygon, Linie oder Punkt, basierend auf dessen Schwerpunkt. Da der Schwerpunkt zu den jeweiligen Objekten abhängig von der Größe und Form des Objektes selber ist, ist dieses Distanzmaß nicht optimal. Jedoch konnte durch Versuchsläufe ein für die Klasse geeignetes Maß gefunden werden, welches die Besonderheiten der Nachbarschaftsverhältnisse zueinander gut beschreibt, weil beide Gebäudekomplexe sehr häufig miteinander in Kombination auftreten. Durch teilweise fehlende Höheninformationen in Schattenbereichen kann es vorkommen, dass die interpolierten Höhenwerte immer noch hoch genug sind, um sie als Gebäude zu identifizieren. Daher besteht vereinzelt die Möglichkeit, dass eine niedrige Klasse neben einer erhöhten klassifiziert wird, obwohl an dieser Stelle Boden ist. Dies sind meistens nur kleine langgezogene Segmente die der Form eines Gebäudes nicht ähneln. Durch die Abfrage des Schwerpunktes dieses Objektes der Klasse „Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen“ zu dem der schon fertigen Klasse „Hochhaus ab 21 Etagen“ lassen sich diese falsch zugeordneten Elemente einfach eliminieren und in die unklassifizierte Klasse rücküberführen. Diese Abfrage gewinnt im Verlauf des Gesamtprozesses an Bedeutung je weiter die Gebäudeextraktion voranschreitet.

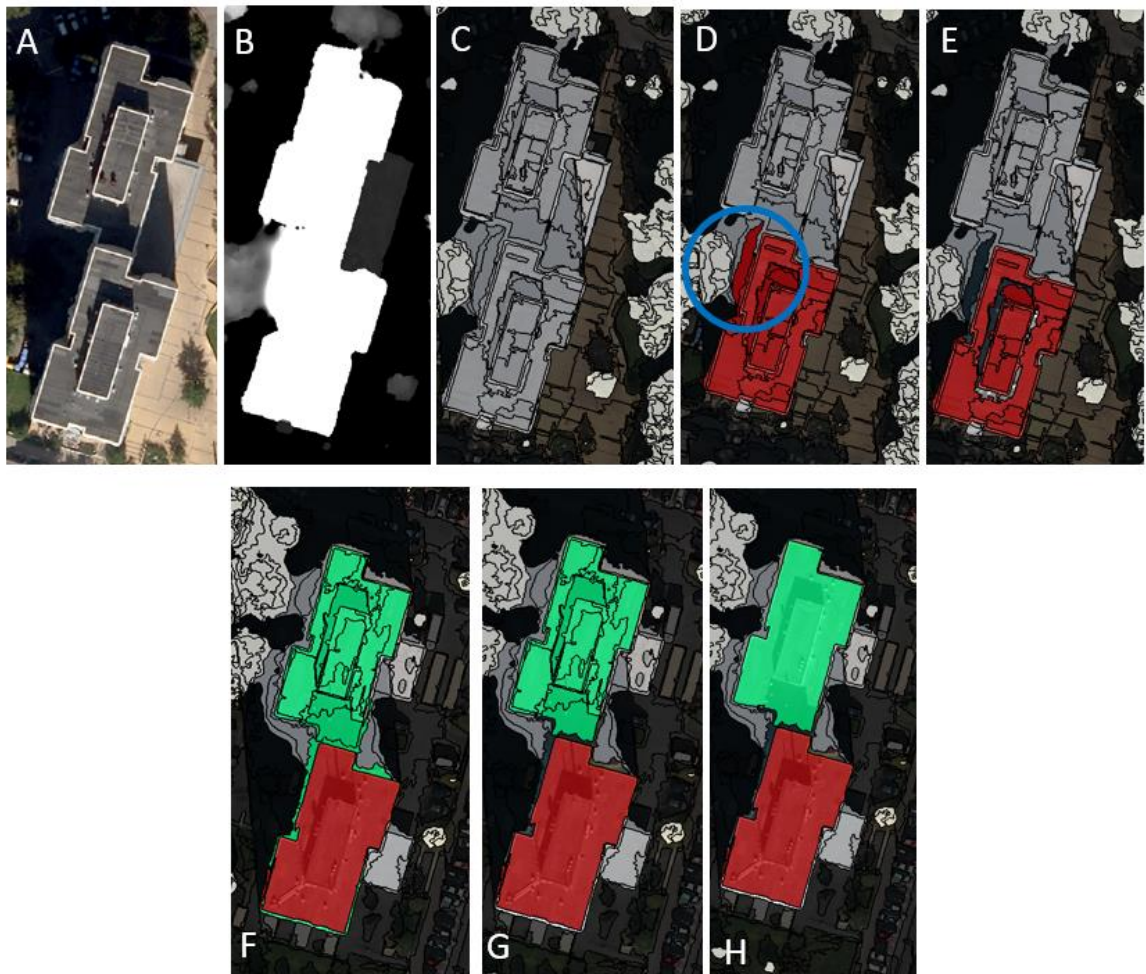


Abb. 5.9 Klassifizierungsablauf anhand eines Hochhauskomplexes.

Um die eben erläuterten Schritte nochmal visuell zu erläutern, zeigt die Abb. 5.9 den Ablauf der Extraktion anhand der Klassen „Hochhaus ab 21 Etagen“ (rot) und „Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen“ (grün). Das Bild A zeigt den Hochhauskomplex in der RGB-Darstellung und das Bild B im nDOM. Das Bild C zeigt die Klasse Gebäude in grau an. Es sind deutlich die Segmente zuerkennen, die den Hochhauskomplex unterteilen. Bild D zeigt den ersten Klassifizierungsschritt, der anhand einer Höhenabfrage auf dem nDOM den ersten Gebäudeteil in die Klasse Hochhaus ab 21 Etagen einordnet. Dabei ist zu erkennen, dass zu viel Fläche extrahiert wird, da die Höheninformationen im nDOM an der Schattenseite des Gebäudes fehlerhaft sind (blauer Kreis). Dies ist wiederum in der Abbildung B gut zu erkennen. Bild E zeigt die Bereinigung dieser Fläche anhand der Count Maske. Dabei werden jedoch auch Schattenflächen mit einem geringen Count-Wert an dem mittleren Dachaufbau eliminiert. Diese können jedoch anhand der *relative border* und *find enclosed by class*-Operatoren wieder der Gebäudeklasse zugeordnet werden. Das Bild F zeigt das Endergebnis für die Klasse. Die Segmente wurden zu einem Gebäudeobjekt verschmolzen. Weiterhin ist zu sehen, dass die nächste Klasse, „Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen“ nach dessen definierten Höhenparametern extrahiert wird. Dabei ist auch zu sehen, dass die gesamte Klasse „Hochhaus ab 21 Etagen“ von dieser Klasse umschlossen wird. Dies liegt wiederum an fehlerhaften Höheninformationen die dicht um das Gebäude noch hohe Werte angeben, obwohl an diesen Stellen bereits der Boden ist. Das Bild G zeigt den Einsatz der *distance to vectors*-Operation. Anhand derer kann die fehlerhaft klassifizierte Fläche der unklassifizierten zugeordnet werden. Das Bild H zeigt das Endergebnis der beiden Klassenabfragen.

Die Klassen „Hochhäuser zwischen 11 bis 16 Etagen“ und „Hochhäuser zwischen 8 und 10 Etagen“ haben eine weitere Besonderheit im Vergleich zu allen anderen Klassen. Sie sind die einzigen, in denen es möglich ist, **Balkonstrukturen** automatisiert zu extrahieren, ohne dabei das Klassifikationsergebnis stark zu beeinträchtigen. Dies wird durch den *mean slope*, also die durchschnittliche Neigung eines Segmentes ermöglicht. Aufgrund der spezifischen Bauform und Höhe der Gebäude ist i.d.R. davon auszugehen, dass es sich um Neubau- oder Plattenbausysteme ohne komplexe Dachaufbauten wie Spitzdächer handelt. Das begünstigt die Vorgehensweise, die Klassen zu separieren. Alles was eine kleinere Neigung als 50° aufweist, wird in die Hauptklasse überführt. Die Neigung von 50° resultiert aus eigenen Versuchsreihen. Daraus ergibt sich, dass Steigungen höher als 50° auf Balkone oder andere Dachelemente hinweisen, die aufgrund ihrer Höhendifferenz zum Dach der jeweiligen Klasse und ihrer verhältnismäßig geringen Größe als Objekte segmentiert wurden, die von den Formparametern schon auf Balkone oder zusammenhängende Balkonsysteme hinweisen. Da zwischen Dachkante und Balkonboden i.d.R. nur ein kleiner Höhenunterschied besteht, jedoch aufgrund der Segmentierung an diesen Stellen Segmente gebildet wurden, die entlang dieser Höhendifferenz verlaufen, ist eine scheinbare Neigung dieser Objekte zu messen, die nicht der Realität entspricht. Diese Anomalie ermöglicht jedoch eine Extraktion von Balkonstrukturen. Die Abb. 5.10 zeigt links die Segmente, die sowohl an den Dachaufbauten, als auch an den Balkonkanten den Gebäudekomplex unterteilen. Die rechte Abbildung zeigt die Klassifikation der Balkone (blau) anhand der erhöhten Neigungswerte. Ebenfalls ist zu erkennen, dass der Schattenbereich an der nördlichen Flanke des Hauses fälschlicherweise ebenfalls als Balkone identifiziert wird.

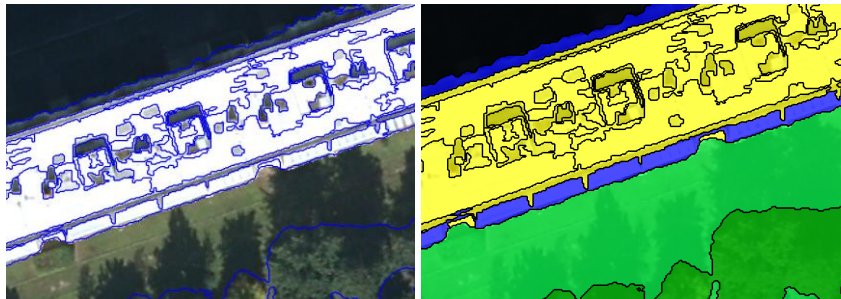


Abb. 5.10 Balkonextraktion, links Segmentierung, rechts Klassifizierung.

Das ist jedoch nur in diesen Klassen möglich, da beispielsweise ein Spitzdachgebäude selber schon eine Dachneigung besitzt und daher keine Unterscheidung zwischen Balkon- und Dachfläche mehr möglich ist. Hochhäuser ab 17 Etagen sind aufgrund ihrer baulichen Struktur ebenfalls nicht dafür geeignet, Balkone zu identifizieren. Deren Grundfläche ist zu gering, um die wenigen von oben sichtbaren Balkone zu extrahieren. Dies liegt vor allem an der Einstellung der Segmentierungsparameter, die diese Strukturen nicht erfassen können. Zusätzlich häufen sich die Fehler in der Klassifizierung von Balkonen je tiefer die Klassen liegen, da auch die Anzahl der Objekte steigt und eine automatisierte Abfrage von einer Vielzahl heterogenen Flächen keine validen Aussagen über die Güte der Klassifizierung erlauben. So birgt die Detektion von Balkonen das Risiko, dass kleinste Segmente, z.B. in Schattenflächen, auf dem Dach des Gebäudes ebenso eine erhöhte Neigung besitzen. Dies liegt meist an vorhandenen Dachaufbauten oder Brandwänden die Häuserkomplexe voneinander trennen. Deren teilweise nur geringe Erhöhung kann dazu beitragen, dass in Schattenflächen keine exakten Höheninformationen zu messen sind und daher diese Flächen als stark geneigt und damit als Balkone identifiziert werden. Da sich Balkone jedoch nur an den Außenfassaden von Gebäuden befinden, können die meisten Steigungen die von

Dachaufbauten ausgehen, mittels *relativ border* und *find enclosed by class* zu der eigentlichen Gebäudeklasse rücküberführt werden. Dies funktioniert jedoch nur in den Klassen zufriedenstellend, bei denen eine gewisse räumliche Trennung zu den Objekten gegeben ist. Ansonsten würden dicht zusammenliegende Komplexe möglicherweise vollständig in die Klasse Balkone überführt werden, was zu einem groben Fehler führen würde.

Überdies bleibt zu bedenken, dass aufgrund der Draufsichtsperspektive, die extrahierte Fläche eines Balkons keinesfalls für alle Balkone die ggf. darunter liegen könnten, steht. Da man nicht weiß, ob sich unter den Balkonen auch andere Balkone befinden, ist es nur möglich, die Anzahl der Fläche mit der Anzahl der Geschosse des jeweiligen Gebäudes zu multiplizieren, um ein ungefähres Maß für die Balkonfläche zu erhalten. Außerdem muss erwähnt werden, dass der Neigungswinkel von 50° in manchen Fällen eine Klassifizierung von Balkonen ermöglicht und in anderen nicht. Das ist allem voran der Segmentbildung geschuldet. Deren Feinheit, also die Einstellungen des *scale parameters* ist entscheidend, ob ein Balkonsegment überhaupt erfassbar ist oder nicht. Natürlich ist die Genauigkeit der Extraktion von kleinsten Flächen wie Balkonen auch von der Datengrundlage und der zur Verfügung stehenden Rechenleistung abhängig. Je hochauflösender die Daten und je leistungstärker das Rechenmedium, desto feinere Segmente können gebildet und anhand ihrer geometrischen Eigenschaften klassifiziert werden. Abschließend ist zu sagen, dass die Detektion von Balkonflächen demnach als ein Versuch anzusehen ist, gebäudegestaltende Aspekte für die Attraktivitätsanalyse bereit zu stellen. Deren Genauigkeit ist jedoch nur visuell durch Feldanalysen oder durch Obliquedaten, also schrägblickende Luftbilddaten zu überprüfen. Da weder die Kapazität einer stichprobenartigen Ortsbegehung, noch eine Obliquedatensatz zu Verfügung stand und keine flächendeckende Extraktion über alle Klassen möglich war, ist auf die Verwendung der Balkone für die Bewertung der Attraktivität von Wohnstandorten verzichtet worden.

Die sich im Folgenden anschließenden Klassen sind, wie im Kapitel 5.1 zu entnehmen, der übergeordneten Klasse der mittleren Gebäude zuzuordnen. Diese besteht aus den Klassen „*Flachdachgebäude zwischen 3 bis 7 Etagen*“ und der Klasse „*Spitzdachgebäude zwischen 3 bis 5 Etagen*“. Diese unterscheiden sich teilweise von dem üblichen Klassifikationsschema. So werden die beiden Klassen anfangs über deren vorab definierte Höhe zwischen 13 bis 25 Metern als eine Klasse extrahiert und deren Segmente direkt zusammengeführt. Somit entstehen schon vorab zusammenhängende Gebäudekomplexe. Dieser Schritt ist notwendig, um eine Unterscheidung der Dachform zu ermöglichen. Beide Klassen zählen zu den am weitesten verbreiteten Gebäudetypen im innerstädtischen Bereich von Berlin. Die Spitzdachklasse steht stellvertretend für Altbaukomplexe oder Gebäude aus der Gründerzeit. Diese weisen durch ihrer schrägen Dächer einen signifikanten Unterschied gegenüber Flachdachgebäuden auf, die i.d.R. für Neubauten bzw. Plattenbauten stehen. Eine Unterscheidung dieser ist also im Hinblick auf eine Attraktivitätsanalyse sinnvoll. Demzufolge wird erneut der Neigungswinkel von 50° angewandt, der die Klassen in Flachdach- und Spitzdachgebäude separiert. Dieser Wert wurde ebenfalls durch eigene Versuchsreihen als derjenige ermittelt, der die visuell besten Ergebnisse in diesen Klassen ermöglicht. Würde eine Zusammenführung der beiden Klassen nicht schon am Anfang erfolgen, würden die Spitzdachgebäude an ihren mittleren Dachflächen als Flachdachgebäude segmentiert werden. Das ist damit zu erklären, dass die meisten Spitzdachgebäude kein tatsächlich spitz zulaufendes Dachtragwerk wie bei klassischen Fachwerkhäusern besitzen, sondern nur deren vordere und rückwärtige Seite Dachschrägen aufweisen. Das mittlere Segment des Dachstuhls ist demnach flach und würde wiederum als Flachdachgebäude klassifiziert werden. Die Abb. 5.11

zeigt ein Klassifikationsergebnis in dem ein *merge* vor der Abfrage der Neigungseigenschaften nicht stattgefunden hat. Zu sehen ist, dass keine klaren Gebäudeobjekte definiert werden können. Manche Komplexe werden mehreren Klassen gleichzeitig zugeordnet.

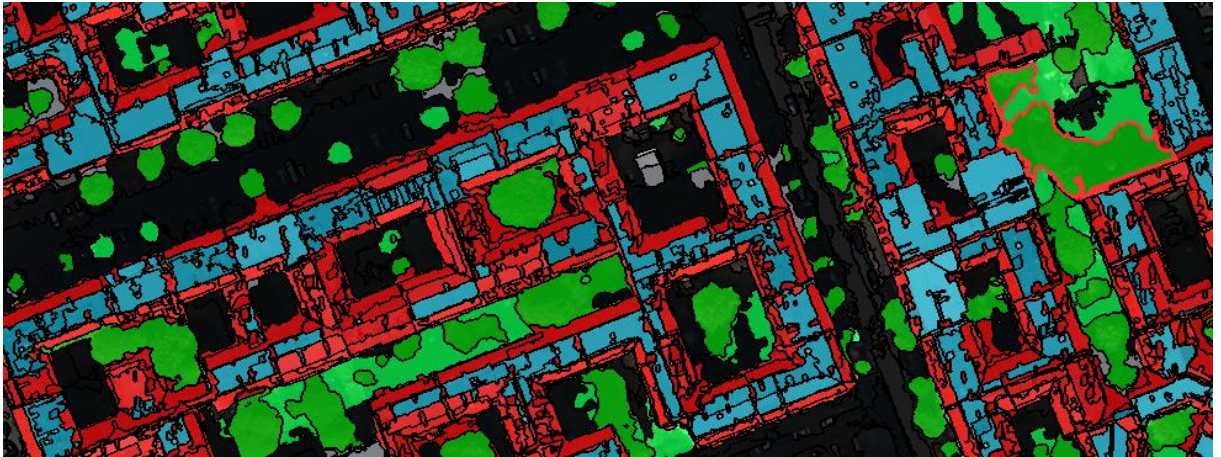


Abb. 5.11 Klassifikationsergebnis der Gebäude mittlerer Höhe ohne Zusammenführung der Segmente vor der Neigungsabfrage.

Daher kommt es insbesondere in Gebieten mit einer großen Häufung an Altbaustrukturen zu starken Fehlklassifizierungen. So kann es vorkommen, dass ein Gebäude teilweise als ein aus drei Gebäuden bestehendes klassifiziert wird, die vordere Seite und hintere Seite des Daches als jeweils ein Gebäude und das mittlere Segment als ein drittes. Diesem Problem lässt sich nicht ohne weiteres mit der üblichen Vorgehensweise entgegenwirken. Die *relative border*-Operation ist aufgrund der Vielzahl kohärenter Elemente nicht effizient einsetzbar. Auch andere Operatoren sind nicht in der Lage, die Vielzahl dieser Elemente korrekt aufzuschlüsseln. Aufgrund dessen wurde ein *merge* aller Segmente angewandt. Das liefert zwar den Vorteil klare Gebäudestrukturen zu extrahieren, jedoch auch den Nachteil, dass Segmente die zusammengeführt sind, ihre geometrischen Eigenschaften verändern. So werden Segmente mit einem niedrigen Neigungswinkel mit Segmenten mit einem hohen Neigungswinkel verrechnet. Der Durchschnittswert kann dann über oder unter dem definierten Schwellwert von 50° für die Neigung liegen. Somit kann ein Flachdachgebäude mit vielen Dachaufbauten zu einem Spitzdachgebäude klassifiziert werden und vice versa. Zudem sind feinere Analysen, wie z.B. die Extraktion von Balkonen nicht mehr möglich. Sind diese beiden Klassen erst einmal extrahiert, kommen die üblichen Abfragen zur Bereinigung der unklassifizierten Schattenflächen auf den Dächern zum Einsatz. Es besteht die Möglichkeit, dass trotz des großzügigen Höhenintervalls, Gebäude der Klasse „Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen“, Dachaufbauten auf den Gebäuden der mittleren Höhenstufen als erhöhte Strukturen identifiziert werden. Diese werden durch den Operator *find enclosed by class* und *relative border* wieder in die jeweilige umliegende Klasse der Flachdächer oder Spitzdächer überführt. Dies geschieht zusätzlich durch einen erhöhten Abfragewert im nDOM. D.h., dass unterhalb einer Höhe von 28 m die Klasse „Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen“ in eine der jeweiligen Gebäudeklassen mittlerer Höhe überführt werden, insofern diese mit deren Nachbarschaftsabfragen als zusammengehörig identifiziert werden. Das weitere Vorgehen richtet sich nach dem oben angesprochenen Grundklassifizierungsschema.

Die Gebäudegruppe mit geringer Höhe besteht aus den Klassen „Gebäude unter 3 Etagen“, „Einfamilienhäuser“ und „Gebäude mit speziellem Nutzen“. Diese sind laut der Klassendefinition unter 13 m angelegt. Insbesondere in dieser Klasse sind viele Bereinigungsvorgänge nötig, da sie

einen großen Anteil an den klassifizierten Gebäuden ausmacht und an der Grenze zu 13 m stark mit den Gebäuden mittlerer Höhe korreliert. So können Dachaufbauten, die höher als 13 Meter sind, auf den Gebäuden geringer Höhe als Gebäude mittlerer Höhe klassifiziert werden. Sie werden mit den üblichen Methoden der *relative border* und *find enclosed by class*-Operatoren bereinigt. Zusätzlich werden alle Gebäude mittlerer Höhe, die mit diesen Nachbarschaftsoperatoren korrelieren und unter 16 m liegen in die Klasse der Gebäude unter 3 Etagen überführt. Dies geschieht ebenfalls mit den unklassifizierten Bereichen. So wird zu Anfang lediglich die Klasse der Gebäude unter 3 Etagen stellvertretend für alle 3 Klassen extrahiert und bereinigt, um die Regelkette so klein und effizient wie möglich zu halten. Nachdem dieser Schritt vollzogen ist, wird die Klasse anhand ihrer Objektgrößen nach der Klassendefinition unterteilt. Das bedeutet das Gebäude unter 3 Etagen die kleiner sind als 300 m² in die Klasse der Einfamilienhäuser überführt werden. Alle Objekte die größer als 5000 m² sind, werden in die Klasse der Gebäude mit speziellem Nutzen eingeordnet. Diese Werte beruhen auf Annahmen und visuellen Überprüfungen der Klassifizierungsergebnisse, da es keine expliziten Einordnungen für diese Gruppen gibt (siehe Kapitel 5.1 Definition der Gebäudeklassen). Da es aufgrund der geringen Fläche der Einfamilienwohnhäuser dazu kommen kann, dass viele kleine Objekte an allen bisher ermittelten Klassen im oberen Höhensegment auftauchen, müssen diese zusätzlich noch einmal bereinigt werden. So kann es vorkommen das Hauseingänge aufgrund ihrer geringen Höhe und Fläche als Einfamilienwohnhäuser extrahiert werden. Dies geschieht zum einen durch die schon oben angesprochene *distance to vector*-Abfrage, und zum anderen durch eine Beschränkung der minimalen Fläche eines Einfamilienwohnhauses von unter 20 m². Dieser Wert beruht ebenfalls auf visuellen Testreihen und bezieht aufgrund seiner geringen Größe dennoch die Möglichkeit mit ein, kleine Gartenlauben zu detektieren.

Zum Ende der Extraktionskette werden nochmals Reinigungsabfragen durchgeführt, die auf Nachbarschaftsoperationen und Höhenabfragen beruhen. Somit können nochmals fehlerhafte Zuordnungen von Objekten revidiert werden und offensichtlich falsche Klassifizierungen eliminiert werden. Dies betrifft vor allem unklassifizierte Flächen, die von anderen Klassen im Laufe des Prozesses ausgeschlossen wurden und nun ihrer richtigen Klasse mittels Nachbarschaftsoperatoren zugeordnet werden können. Aber auch Balkonflächen die fälschlicherweise keinen Nachbarschaftsbezug zu deren eigentlichen Gebäudeklassen („Hochhaus 11 bis 16 Etagen“ und „Hochhaus 8 bis 10 Etagen“) aufweisen, werden hier nochmal aus der Klassifikation ausgeschlossen.

Die Klasse **Dachbegrünung** wurde, wie eingangs erwähnt, bis zu diesem Punkt über alle Klassen hinweg extrahiert. Dabei ist davon ausgegangen worden, dass erhöhte Vegetation, also ein Baum, der vollständig von einer Gebäudeklasse umschlossen ist, nichts anderes als ein begrüntes Dach sein kann. Diese Annahme ist jedoch nur bedingt richtig. Vor allem in Hinterhöfen von Altbaublöcken (Klasse Spitzdach zwischen 3 bis 5 Etagen) kommt es gehäuft vor, dass ein dort wachsender Baum, vollständig von einem Gebäude umschlossen ist, aber in der Klassifikation durch die Abfrage *find enclosed by class*, zu Dachgrün deklariert wird. Um einen Teil dieser fehlklassifizierten Dachflächen wieder zu erhöhter Vegetation zu transformieren, wird auf die Funktion der *mean absolute difference* basierend auf dem nDOM zurückgegriffen. Damit wird die durchschnittliche absolute Differenz zwischen dem Höhenwert der Dachbegrünung und der umliegenden Gebäude ermittelt. Da im Regelfall davon auszugehen ist, dass ein Baum höher oder niedriger ist als die ihn umschließenden Gebäude, kann die durchschnittliche Differenz der Gebäudehöhe zum Dachgrün diese Unterschiede detektieren. Daher wurde eine Einstellung von

unter 2 m durchschnittlicher Abweichung der Dachbegrünung zu dem umliegenden Gebäude gewählt, um diese als korrekte Dachbegrünung anzunehmen. Ab einer höheren Abweichung ist davon auszugehen, dass es sich kaum mehr um eine begrünte Dachfläche handeln kann, da in den seltensten Fällen, auch aus statischen Gründen, eine höhere Begrünung, wie Bäume auf Dächern üblich ist. Somit kann ermittelt werden, ob es sich tatsächlich um einen Baum handelt oder nicht. Mit dieser Methode lassen sich nicht alle fehlerhaft klassifizierten Dachbegrünungen beheben. Jedoch verbessert sie die Ergebnisse signifikant.

Schlussendlich werden die einzelnen Klassen nochmals vereinigt, da es aufgrund der Nachbarschaftsabfragen und Bereinigungen zu neuen Zuordnungen einiger Segmente zu bis dahin fertigen Klasse kommen kann. Dieser Schritt erfolgt, damit diese nicht als zwei Objekte dargestellt werden, wenn sie nebeneinander liegen. Ein *merge* ist daher unverzichtbar. Dieser *merge* wird im Weiteren immer gegen Ende eines Klassenblockes durchgeführt, da das Hinzufügen von kleineren Segmenten dazu führen kann, dass diese durch die Eliminierung von Flächen kleiner als 100 m² wieder zu unklassifizierten Objekten werden, obwohl sie schon korrekt eingeordnet werden konnten. Damit schließt die Klassifikationsprozedur ab.

Aufgrund der Komplexität einiger Abfragen wurde an dieser Stelle nur auf die wichtigsten und grundlegendsten Operationen in der Klassifikation eingegangen. Kleinere Abfragen, die Bereinigung betreffend, wurden auch aufgrund der Übersichtlichkeit nicht thematisiert und sind der Regelkette im Anhang 7.B zu entnehmen.

Export der Daten:

Die Objektdatenbank in eCognition stellt einen gesonderten Punkt dar, obwohl sie ein fester Bestandteil des Workflows ist. Ohne diese könnten die fertig extrahierten Klassen nicht in ein Shape Format transformiert und in einem GIS nutzbar gemacht werden. Wie schon in Kapitel 4.2 angesprochen, bildet diese während des Segmentierungsverfahrens eine Datenbank zu jedem Bildobjekt. Dort werden wichtige Attribute wie geometrische oder spektrale Eigenschaften, Informationen über Nachbarschaften von Objekten, etc. gespeichert. Diese Attribute lassen sich für die einzelnen Klassen je nach spezifischem Nutzen für die Weiterverarbeitung in einer Attributtabelle, die in der jeweiligen Shape-Datei der Klasse integriert ist, exportieren. Diese Funktion ist besonders essentiell, da im Hinblick auf eine Bewertung der Attraktivität von Wohnstandorten mittels geometrischer Maße, diese schon berechnet vorliegen und nicht gesondert in einem zusätzlichen Programm wie in einem GIS neu und aufwendig erzeugt werden müssen. Dies spart also im Prozessablauf sehr viel Zeit. Das Aufsetzen einer automatisiert ablaufenden Merkmalsextraktion der Objekte wäre alleine schon anhand von 14 Klassen ein umfangreicher und unnötiger Arbeitsschritt gewesen. Da die geometrischen Eigenschaften der klassifizierten Objekte die einzige Quelle für eine Attraktivitätsanalyse darstellen, werden im Folgenden alle Attribute aufgezählt die in den Export eingebunden wurden, unabhängig davon ob diese in der Analyse auch tatsächlich verwendet fanden. Die Anwendbarkeit einiger Attribute ließ sich erst mit der Analyse selber überprüfen.

Allen Klassen gleich, ist die Extraktion der Fläche in m² für jedes Objekt. Da im Weiteren für Wasserkörper und bodennahe Vegetation kein anderes Attribut einen Mehrwert ergeben hätte, sind diese damit abgeschlossen. Ein weiteres wichtiges Attribut stellt die durchschnittliche Höhe (*mean nDOM*) der Objekte in Dezimetern dar. Da die erhöhte Vegetation und die Dachbegrünung keine weiteren Parameter benötigen, sind diese abschließend attribuiert. Die übrigen Klassen haben zusätzlich zu den eben angesprochen Variablen noch das Volumen in m³, die Länge sowie

die Breite der Objekte in m. Die Länge eines Objektes wird durch die Wurzel der Anzahl der Pixel des Objektes multipliziert mit dessen Verhältnis von Länge zu Breite ermittelt. Die Breite errechnet sich aus der Anzahl der Pixel des Objektes geteilt durch dessen Verhältnis zu Breite und Länge.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass diese Berechnung bei kurvigen Objekten zu unzureichenden Aussagen über dessen tatsächliche Länge führt. Für explizitere Aussagen, ist die Berechnung der Länge und Breite basierend auf *Skeletons* empfehlenswerter. So bildet beispielsweise die Operation *Curvature/Length* die Summe aller Richtungsänderungen einer Hauptlinie (*main line*), die den Mittelpunkt der gebildeten Dreiecke verbindet. Die Abb. 5.12 veranschaulicht das Prinzip der Funktion. Die *Skeletons* unterteilen mittels Delaunay-Triangulation ein Objekt in Dreiecke (schwarz und blau). Der Mittelpunkt dieser Dreiecke wird als Knotenpunkt bezeichnet. Die Richtungsänderung wird an den jeweiligen Knotenpunkten vollzogen. Die Summe aller Distanzen liefert dann die tatsächliche Länge des Objektes (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 365 ff.).

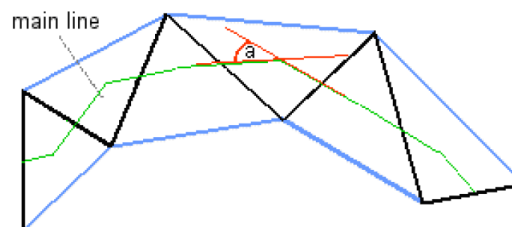


Abb. 5.12 Funktionsschema der Längenberechnung von kurvigen Objekten mittels Skeletons. (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 367).

Auf diese Funktion wurde jedoch nicht zurückgegriffen. Sie hätte jedoch die Ergebnisse auch in Bezug auf die räumlichen Abfragen während der Klassifizierung verbessern können.

Weitere geometrische und formbeschreibende Parameter sind die *Asymmetrie*, welche die relative Länge eines Objektes verglichen zu einem regulären Polygon beschreibt. Dafür wird eine Ellipse an das Polygon angeglichen, welche durch die Werte der kleinsten und größten Achse beschrieben wird. Je höher der Wert, desto höher die Asymmetrie des Objektes. Der Wertebereich verläuft zwischen 0 und 1 (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 339).

Der *Border Index* beschreibt wie zackig oder schroff ein Objekt ist. Dabei steigt der Wert je ausgefranster ein Objekt ist. Dabei wird anders als beim Shape Index eine rechteckige und keine quadratische Approximation verwendet. Das kleinste im Objekt eingeschlossene Rechteck wird gebildet und anschließend nach dem Anteil zwischen der Länge der Grenze des Objektes (*border length*) berechnet (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 341).

Die *Compactness* beschreibt wie kompakt ein Objekt ist. Die Funktion ist dem *Border Index* ähnlich, basiert jedoch auf der Fläche des Objektes. Je kompakter ein Bildobjekt ist, desto kleiner ist seine Umfang. Sie wird durch die Länge und Breite, geteilt durch die Anzahl der Pixel des Objektes berechnet (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 341).

Die *Density* (Dichte) beschreibt die räumliche Verteilung der Pixel eines Objektes. Dabei entspricht das Maß der höchsten Dichte einem Quadrat. Eine Linie, bzw. eine fadenförmige Struktur würde einer geringen Dichte entsprechen. Es wird berechnet aus der Anzahl der Pixel des Objektes geteilt durch seinen Radius basierend auf der Kovarianzmatrix (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 343).

Die Roundness (Rundheit) beschreibt wie sehr ein Objekt einer Ellipse ähnelt. Es wird durch die Differenz einer umschließenden Ellipse und der von ihr eingeschlossenen Ellipse berechnet. Der Radius der größten eingeschlossenen Ellipse wird von dem Radius der kleinsten umschließenden subtrahiert (TRIMBLE ECOGNITION, 2015: 352).

Einige dieser Variablen, jedoch nicht alle werden in der anschließenden Attraktivitätsanalyse genutzt.

Problemdiskussion

Eine explizite Analyse der Klassifikationsfehler erfolgt in Kapitel 6. An dieser Stelle werden nur allgemeine Probleme, die die Klassifikation betreffen, diskutiert. Insbesondere bei der Klassifizierung von Einfamilienwohnhäusern tauchen Probleme in Form von Überklassifizierungen auf. Da die Ausgangshöhe für Gebäudeobjekte bei 2,8 m festgelegt wurde und eine Fläche von 20 bis 300 m² angenommen wird, fallen viele Strukturen in diese Klassendefinition, die eigentlich keine Gebäude sind. So werden große Container oder parkende Busse, als auch Schuttberge und andere Kleinstobjekte wie große Werbebanner oder Leitungssysteme als Gebäude dieser Klasse definiert, was in der Abb. 5.13 beispielhaft dargestellt ist.



Abb. 5.13 Fehlklassifizierung von Einfamilienwohnhäusern.

Demnach ist in dieser Klasse mit einem hohen Anteil an fehlerhaft klassifizierten Gebäuden zu rechnen. Des Weiteren sind Brückenstrukturen im nDOM ebenfalls als Gebäude erfasst, was dazu führt, dass diese in die Klassen „Gebäude unter 3 Etagen“ oder aufgrund der Größe einer Brücke eher in die Klasse der „Gebäude mit speziellem Nutzen“ eingeordnet sind. Dieses Phänomen betrifft nur die Gebäude geringer Höhe und schließt die Klasse der Einfamilienwohnhäuser gänzlich aus, da diese einfach von ihrer Flächendefinition zu klein ist. Die Abb. 5.14 zeigt ein Beispiel für eine fehlerhafte Klassifizierung. So wird die Brücke und dazugehörige Straße als Gebäudestruktur identifiziert.

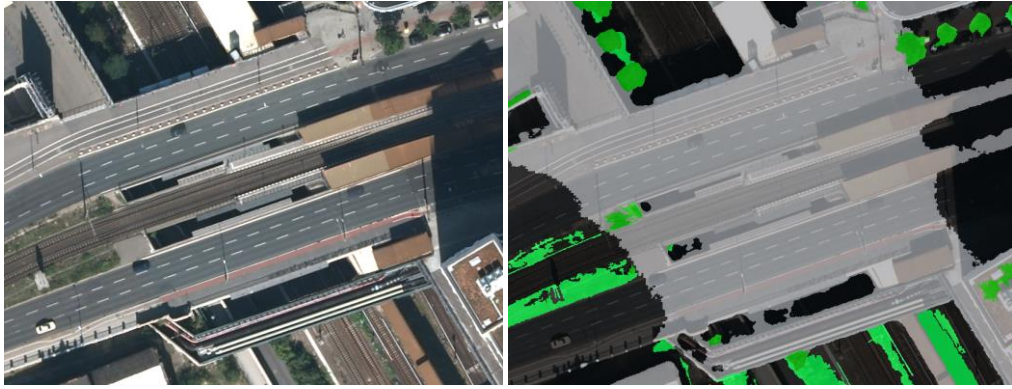


Abb. 5.14 Fehlerhafte Erfassung eines Brücken- und Straßenelementes.

Außerdem lassen sich aufgrund der hohen Heterogenität der Objekthöhe und Form, fehlerhafte Zuweisungen mehrerer Klassen auf einen Gebäudekomplex mit unterschiedlichen Höhenstufen und komplexen sich abwechselnden geometrischen Formen nicht vermeiden. Da die Bereinigungsabfragen nicht alle Parameter berücksichtigen können, sind insbesondere bei diesen Gebäudestrukturen korrekte Klassifizierungen kaum möglich. Speziell an Klassenübergängen entstehen Fehler. Die Höhengsprünge führen an Dachflächen mit unterschiedlichen Höhenwerten (Dachaufbauten) zu einer Zuordnung zweier oder mehrere Klassen zu einem Gebäudeobjekt. Die Abb. 5.15 zeigt dies anhand des Ringcenters an der Frankfurter Allee.

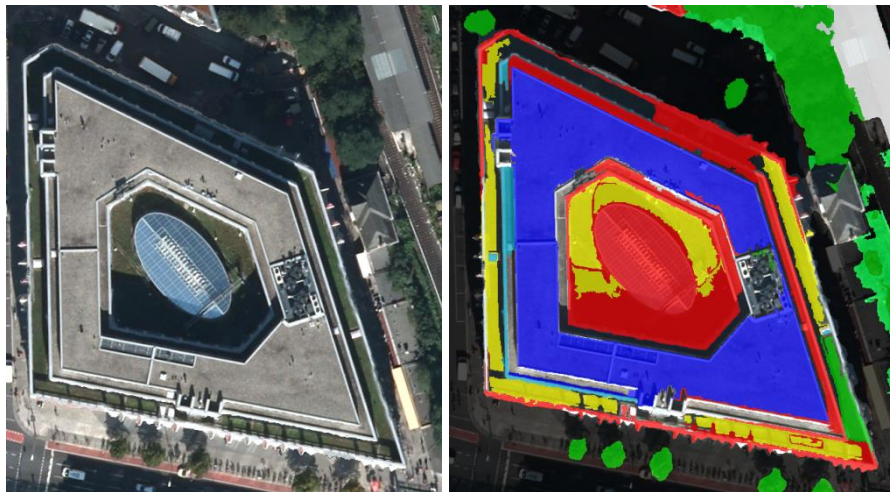


Abb. 5.15 Multiple Klassifizierung eines Gebäudekomplexes.

Auch Schattenflächen und das Dach verdeckende Baumstrukturen verhindern eine vollständige Extraktion einiger Objekte. Weiterhin ist es kaum möglich, zusammenhängende Objekte wie Spitzdachgebäude nach deren tatsächlichen Gebäudegrundriss zu trennen. Deren enge bebaute Blockstruktur macht es teilweise unmöglich, sie an ihren Grenzen (z.B. Brandwänden) aufzutrennen. Spektrale Eigenschaften sind dafür nicht verwendbar, da sie aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes zu heterogen über alle Gebäudeklassen verteilt sind. Die Typisierung der Gebäudestrukturen über das nDOM erscheint daher als die geeignete Variante, Gebäudeobjekte zu klassifizieren.

Prinzipiell ist zu sagen, dass eine Veränderung der Einstellungen zwar an einer Stelle des Bildes zu Verbesserungen der Klassifikation führen kann, jedoch dadurch an einer anderen Stelle Verschlechterungen hervorgerufen werden können. Daher ist gerade bei automatisierten Prozessabläufen ein Kompromiss notwendig, da nicht alle Fehler behebbar sein können. Eine

manuelle Nachbearbeitung kann zwar die Ergebnisse verbessern, ist jedoch bei der Größe der Untersuchungsgebiete nicht wirtschaftlich. Je einfacher und schneller ein Prozess abläuft, ohne die Qualität der Ergebnisse zu beeinflussen, desto besser ist er. Die Güte der Klassifikation ist immer von der Segmentierung und den Eingangsdaten abhängig. Um Attraktivitätsmerkmale wie Balkone oder ggf. Fassadentexturen zu extrahieren, könnten schrägblickende Luftbilddaten (Obliquedaten) einen Mehrwert liefern. Letztendlich konnte jedoch eine gute automatisierte OBIA durchgeführt werden, die sowohl Umgebungsdetails, als auch verschiedenste Gebäudetypen in den beiden großflächigen Untersuchungsgebieten erfasst und für eine Attraktivitätsanalyse für Wohnstandorte geometrische Attribute in einer Vektordatenbank bereitstellt.

Erweiterte Bereinigung

Nach dem Export der Daten zu Shape-Dateien kommt ein weiterer Bereinigungsschritt zum Einsatz, der als kleines Programm mittels *GIS-Modelbuilder* implementiert wurde. Dieses Programm hat den Zweck, mittels eines OpenStreetMap-Layers (OSM) die Gebäudeklassen: „Gebäude unter 3 Etagen“ und „Gebäude mit speziellem Nutzen“ von den sehr groben Klassifikationsfehlern zu befreien, die die Brückensegmente betreffen. Da ursprünglich kein Vektordatensatz benutzt werden sollte, ist an dieser Stelle jedoch eine Ausnahme gemacht worden, da es sich bei dem verwendeten Vektordatensatz um frei zugängliche Geodaten handelt und lediglich ein Teil des Schienennetzes (*light rail*) überhaupt für die automatisierte Bereinigung verwendet werden kann. Im weiteren Verlauf werden nur Objekte in den beiden genannten Klassen gelöscht. Der Einsatz eines Straßennetzes würde zu viele korrekt ermittelte Gebäudestrukturen in diesen Klassen eliminieren. Das Programm löscht also alle Großen Elemente wie Brücken, die das Liniensegment (*light rail*) schneidet. Zusätzlich wird für die im nächsten Schritt anstehende Genauigkeitsanalyse ein *merge* alle Gebäudeklassen vollzogen um ein Accuracy Assessment durchführen zu können (siehe Kapitel 6.3). Dafür mussten jedoch auch die begrünten Dachflächen wieder in die gesamte Gebäudeklasse mit einfließen, da ansonsten unklassifizierte Flächen in den Gebäudeklassen entstehen, die eine Genauigkeitsanalyse der Gebäudeklasse verfälscht hätte. Somit werden nach der Bereinigung der Brückenelemente, alle Klassen mit der Dachbegrünung verschmolzen. Diese werden dann nochmal zu der Hauptklasse „Gebäude“ vereinigt, um für die Genauigkeitsuntersuchung der OBIA nicht unnötig viele Klassen überprüfen zu müssen. Im Anschluss daran werden die Shapedateien zu einer *File Geodatabase* und zusätzlich in einem ArcGIS Map Package zusammengeführt. Diese Daten sind ebenfalls für jedes Untersuchungsgebiet der Arbeit beigelegt.

6 Genauigkeitsanalyse der objektbasierten Klassifizierung

Unter Verwendung des im vorangegangenen Kapitel dargestellten objektbasierten Ansatzes konnten als Objektklassen Gebäude, Vegetation und Gewässer aus den Daten der UltraCam X Kamera abgeleitet und kartiert werden. Diese Informationen müssen auf ihre Genauigkeit und Fehlerfreiheit überprüft werden. Ziel der Genauigkeitsanalyse ist es, systematische und zufällige Fehlerquellen zu analysieren, um mögliche Modifizierungen an den Parametern der OBIA vornehmen zu können, die die Zuverlässigkeit des Verfahrens verbessern. Da in dieser Arbeit, aufbauend auf den Klassifizierungsergebnissen, weitreichendere Daten zur Bewertung der Attraktivität von Gebäuden im urbanen Bereich erhoben werden sollen, ist die erreichbare Genauigkeit ausschlaggebend für die Qualität der Ergebnisse (CONGALTON, 2001: 321).

6.1 Strategien der Genauigkeitsanalyse und der Wahl der Referenzdaten

Für die Genauigkeitsanalyse werden in der Regel verfügbare Referenzdaten genutzt (ground truth). Diese können z.B. durch terrestrische Erhebungen ermittelt werden, oder sie werden aus den verwendeten Luftbilddaten selbst extrahiert. In dem Fall wird dann angenommen, dass diese Referenzdaten den zu untersuchenden Sachverhalt korrekt wiedergeben (CONGALTON & GREEN, 1999: 4). Die für die Validierung in Frage kommenden terrestrischen Datensätze für diese Arbeit beziehen sich auf die durch Vermessungsämter erhobenen Grundrissinformationen von Gebäuden aus dem Liegenschaftskataster, dessen darstellender Bestandteil die Automatisierte Liegenschaftskarte vom Raum Berlin (ALK-Berlin) ist. Ein weiterer Referenzdatensatz für die Genauigkeitsanalyse sind die für die OBIA verwendeten Luftbilder, die als Grundlage für die stichprobenartige visuelle Beurteilung der Klassifikationsgüte verwendet werden.

Bei der Verwendung der Luftbilddaten für die Genauigkeitsanalyse muss beachtet werden, dass aufgrund der Größe eines Luftbilddatensatzes ein flächendeckender pixelweiser Vergleich mit der gesamten zu klassifizierenden Fläche in der Regel nicht möglich ist. Deshalb werden Stichproben zur Überprüfung der Korrektheit der Klassifikation festgelegt (CONGALTON & GREEN, 1999: 4; LILLESAND et al., 2004: 588). Es ist das Ziel, diese so zu wählen, dass sie repräsentativ für das Untersuchungsgebiet und für die zu untersuchenden Objektklassen sind. Dabei entscheiden die räumliche Unabhängigkeit und die Anzahl der gewählten Testgebiete über die Qualität des Ergebnisses (CONGALTON & GREEN, 1999: 4; LILLESAND et al., 2004: 588).

Nach CONGALTON (2001: 327) sollten als Stichprobenvarianten Testgebiete fungieren, die sich einzelnen Pixeln, Clustern von 3 x 3 Pixeln sowie Polygonen zuordnen lassen. Die konkrete Fragestellung bzw. der spezifische Nutzen für das jeweilige Projekt bestimmt, welche der drei genannten Varianten am sinnvollsten zur Anwendung kommt.

Der erste Schritt einer Genauigkeitsanalyse nach CONGALTON (2001: 322) ist die visuelle Beurteilung des Klassifikationsergebnisses. Sie dient der Vorkontrolle des Ergebnisses. Liefert bereits die visuelle Inspektion unzureichende Ergebnisse, sind erneute Bild- und Klassifikationsanalysen durchzuführen. Ist das Ergebnis hinreichend, kann eine quantitative Analyse der Genauigkeit folgen.

Bei der Wahl der eingesetzten Referenzdaten ist es wünschenswert, dass sie zeitnah zu den verwendeten Fernerkundungsdaten erhoben werden, um temporal Variationen ausschließen zu können, die die Genauigkeit reduzieren. Für die in dieser Arbeit verwendeten Luftbilddaten sind diese Anforderungen gegeben, da der für die OBIA verwendete Datensatz gleichzeitig auch als

Referenzdatensatz verwendet wird. Die hohe räumliche Auflösung der verwendeten UltraCam X Daten begünstigt die zu erwartenden Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse.

Der zweite verwendete Datensatz zur Validierung sind luftbildunabhängige, terrestrisch erhobene Daten der ALK. Der Datensatz der ALK ist auf dem Stand vom Juni 2012 und weist somit eine hinreichend gute zeitliche Nähe zum Datensatz auf, der mit der UltraCam X 2010 erhoben wurde. Jedoch sind Differenzen durch bauliche Veränderungen zwischen den Datensätzen zu erwarten. Die ALK archiviert Gebäudegrundrisse (Form, Fläche). Sie können somit als Validierungsgrundlage für den Vergleich verwendet werden. Dachüberstände, Terrassenvorbauten oder andere nicht grundrisskonforme Gebäudeteile, die mit Fernerkundungsdaten erfassbar sind, werden von der ALK nicht wiedergespiegelt. Gleichzeitig sind in der ALK die maximale Gebäudegeschossanzahl sowie die Gebäudenutzung als Informationen archiviert. Eine Überprüfbarkeit der extrahierten Flächen wie Dachbegrünung, Balkone, Grünflächen und Wasserareale war aufgrund fehlender Referenzdaten nicht möglich. Grünflächen und Wasserareale sind in der ATKIS-Datenbank (Amtliches Topographisch- Kartographisches Informationssystem) archiviert, die für die Arbeit nicht zur Verfügung stand. Diese Flächen wurden mit UCX-Daten auf ihre Extraktionsgenauigkeit hin überprüft.

Neben einem zeitlichen Versatz zwischen den Luftbilddaten und den Liegenschaftsdaten beeinflussen andere Faktoren wie die Methodik der Aufnahme der Daten, deren Quelle, sowie deren Genauigkeit die Vergleichbarkeit der Referenzdaten und entscheiden über die Zuverlässigkeit der Klassifikationsergebnisse. Deren jeweiliger Einfluss wird in der Arbeit bei deren konkretem Auftreten thematisiert und diskutiert.

LANDIS & KOCH (1977: 159-174) schlagen ein Bewertungsschema für die Klassifikationsgenauigkeit vor, das in drei Klassen unterteilt ist. Diese sind wie folgt definiert:

- sehr gut (almost perfect): 0,81 – 1 (81% – 100 %)
- gut (substantial): 0,61 – 0,8 (61% – 80%)
- mäßig (moderate): 0,41 – 0,6 (41% – 60%).

CONGALTON & GREEN (1999: 45) kommen zu der Einschätzung, dass die Grenze zwischen einem akzeptablen und inakzeptablen Ergebnis jeweils anwendungsspezifisch evaluiert werden muss und ggf. höher angesetzt werden kann.

Eine probate Methode zur quantitativen Überprüfung von Klassifikationsergebnissen ist die Erstellung einer Konfusionsmatrix, auch Fehler- oder Error Matrix genannt (CONGALTON & GREEN, 1999: 641; CONGALTON, 2001: 323f; LILLESAND et al., 2004: 586). Sind die Referenzdaten festgelegt, ist es in der Folge möglich, wahr und falsch zugeteilte Objektklassen zu vergleichen. Die Konfusionsmatrix ist ein tabellarischer Vergleich der Referenzdaten mit den korrespondierenden Ergebnissen der Klassifizierung. D.h. hierbei werden die klassifizierten Objekte den wahren Klassenzugehörigkeiten aus dem Referenzdatensatz gegenübergestellt. Für jede Klasse wird ermittelt, wie viele der betrachteten Pixel, Cluster oder Polygone korrekt oder falsch klassifiziert wurden. Die Spalten repräsentieren die Pixel der Referenzpunkte der jeweiligen Klasse, während die Zeilen der Matrix deren Zuordnung im Zuge der Klassifikation wiedergeben (siehe Abb. 6.1).

		j = Spalten (Referenz)			Σ - Zeile
		1	2	k	n_{j+}
i = Zeilen (Klassifizierung)	1	<i>n₁₁</i>	<i>n₁₂</i>	<i>n_{1k}</i>	<i>n₁₊</i>
	2	<i>n₂₁</i>	<i>n₂₂</i>	<i>n_{2k}</i>	<i>n₂₊</i>
	k	<i>n_{k1}</i>	<i>n_{k2}</i>	<i>n_{kk}</i>	<i>n_{k+}</i>
Σ - Spalte	n_{+j}	<i>n₊₁</i>	<i>n₊₂</i>	<i>n_{+k}</i>	<i>n</i>

Abb. 6.1 Schematische Darstellung einer Konfusionsmatrix (Quelle: CONGALTON & GREEN, 1999: 47).

In der Konfusionsmatrix kennzeichnet der Buchstabe „j“ die Referenzklassen und „i“ die Ergebnisklassen. Korrekt identifizierte Werte werden durch diagonale Zellen abgebildet (grau), während die Zellen ober- und unterhalb der Diagonalen für jede Spalte zeigen, welcher Klasse fehlklassifizierte Referenzpunkte zugeordnet wurden. Simultan kann man bei zeilenweiser Beobachtung Pixel identifizieren, die fälschlich einer jeweilig anderen Klasse zugeordnet wurden. Die Anzahl der Stichproben, oder auch Samples genannt, richtet sich nach der Anzahl der klassifizierten Pixel. Eine ausführliche Analyse zur Herleitung der für die vorliegende Arbeit verwendeten Stichproben wird im Kapitel 6.2 beschrieben.

Aus der Konfusionsmatrix können mehrere statistische Werte als Maß für die Genauigkeit und die Güte der Klassifizierung abgeleitet werden. Die im Folgenden erläuterten Definitionen und Genauigkeitsmaße wurden aus CONGALTON & GREEN (1999: 46 ff.) entnommen. Dazu gehört die Gesamtgenauigkeit (overall accuracy), welche sich aus der Summe aller korrekt klassifizierten Pixel, dargestellt durch die Hauptdiagonale der Matrix, dividiert durch die Gesamtsumme *n* aller Pixel errechnen lässt (Abb. 6.1). Die Berechnung liefert die Anzahl der richtig klassifizierten Pixel. Es lassen sich jedoch keine Aussagen über die Qualität der jeweiligen Klassen ableiten. Daher ist die Berechnung weiterer Maße im Hinblick auf eine detaillierte Qualitätsevaluierung der einzelnen Objektklassen notwendig. Die Berechnung der Gesamtgenauigkeit *Q_A* folgt danach der Gleichung:

$$Q_A = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{n} \quad (6-1)$$

wobei *n_{ii}* – die Elemente der Hauptdiagonalen der Matrix, *k* – die Anzahl der Klassen und *n* – die Anzahl der Referenzpixel sind.

Weiterhin kann eine Herstellergenauigkeit *P_A* (producer's accuracy) definiert werden, die das Verhältnis der korrekt klassifizierten Pixel (eine Zahl aus der Hauptdiagonalelemente) zu der Gesamtzahl der Referenzwerte der jeweiligen Klasse (Spaltensummen) widerspiegelt und ein Maß dafür liefert, zu wieviel Prozent die Referenzdaten mit den Klassifizierungsergebnissen übereinstimmen. Sie folgt der Gleichung:

$$P_A = \frac{n_{jj}}{n_{+j}} \quad (6-2)$$

wobei n_{jj} – korrekt zur Klasse j zugewiesene Pixel und n_{+j} – die Gesamtzahl der Referenzpixel der Klasse j (Spaltensumme) sind.

Die Herstellergenauigkeit wird von Unterlassungsfehlern (omission errors) beeinflusst, also wenn Pixel nicht der richtigen Klasse zugewiesen werden, sondern einer anderen.

Die Nutzergenauigkeit U_A (user's accuracy) ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der ein klassifizierter Pixel derselben Klasse den Referenzdaten zuzuordnen ist, also anzeigt, zu wieviel Prozent das Klassifikationsergebnis mit dem Referenzdatensatz übereinstimmt. Die Nutzergenauigkeit ergibt sich aus dem Quotienten der korrekt klassifizierten Pixel (eine Zahl aus der Hauptdiagonale) und der Gesamtzahl der dieser Klasse zugewiesenen Pixel und folgt der Gleichung:

$$U_A = \frac{n_{ii}}{n_{+i}} \quad (6-3)$$

wobei n_{ii} – korrekt zur Klasse j zugewiesene Pixel und n_{+i} – die Gesamtzahl der Ergebnispixel der Klasse i (Zeilensumme) sind.

Die Nutzergenauigkeit wird von sogenannten Überlassungsfehlern (commission errors) beeinflusst. Sie geben an, ob Pixel fälschlicherweise einer Klasse zugewiesen werden, der sie nicht angehören.

In Tab. 6.1 ist ein Beispiel einer Fehlermatrix aufgeführt. Zu sehen ist, dass insgesamt 19 Pixel, die nach den Referenzdaten tatsächlich *Wasser* sind, fälschlicher Weise den Klassen *Bodennahe Vegetation*, *Erhöhte Vegetation* und *Gebäude* zugeordnet wurden. Die Überlassungsfehler werden in den Zeilen ermittelt und sagen aus, wie oft ein Pixel fälschlicher Weise der eigentlich zu klassifizierenden Klasse zugeordnet wurde. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass 14 Pixel der Klasse „*Erhöhte Vegetation*“ und 4 Pixel aus der Klasse „*Gebäude*“ fehlerhaft als *Wasser* klassifiziert wurden.

Referenz Klassifizierung	Wasser	Bodennahe Vegetation	Erhöhte Vegetation	Gebäude	Zeilensumme
Wasser	32	0	14	4	50
Bodennahe Vegetation	8	102	25	15	150
Erhöhte Vegetation	7	9	80	4	100
Gebäude	4	12	5	59	80
Spaltensumme	51	123	123	82	380

Gesamtgenauigkeit: $Q_A = (32+102+80+59)/380 = 0,718 * 100 = 71,8\%$

Herstellergenauigkeit: P_A
(Wasser) $= 32/51 = 0,627 * 100 = 62,7\%$

Nutzergenauigkeit: U_A
(Wasser) $= 32/50 = 0,64 * 100 = 64\%$

Tab. 6.1 Schematische Darstellung einer Konfusionsmatrix adaptiert nach CONGALTON & GREEN (1999: 46) und die Berechnung einiger beispielhafter Genauigkeitsmaße.

6.2 Ermittlung der Stichprobenanzahl für die Genauigkeitsanalyse der objektbasierten Klassifizierungsergebnisse

In den meisten Fällen kann bei einer empirischen Genauigkeitsuntersuchung eine Betrachtung jedes einzelnen Elements der Grundgesamtheit aus Zeit- und Kostengründen nicht erfolgen. Infolge dessen besteht die Notwendigkeit, eine Teilmenge aus der Grundgesamtheit zu selektieren (Stichprobe). In Abhängigkeit von der Fragestellung variieren die Grundgesamtheit (Population) und die Stichprobe und stellen somit keine feste Größe dar (ATTESLANDER, 1971: 206 f., MOSSIG, 2012: 2).

Das Ziel der Stichprobenauswahl ist es, Rückschlüsse von den Ergebnissen der Stichprobe auf die Eigenschaften der Grundgesamtheit ziehen zu können. Wenn dies gewährleistet ist, gilt die Stichprobe als repräsentativ. Zusätzlich wird versucht, die Vergleichbarkeit der Aussagen der Genauigkeit des Stichprobenergebnisses zur Genauigkeit aller Elemente der Grundgesamtheit zu ermitteln. Die Grundgesamtheit bezeichnet die Menge aller Untersuchungselemente. Die Untersuchung der kompletten Grundgesamtheit wird als Vollerhebung bezeichnet (BAHRENBURG et al., 2010: 19).

Die genaue Größe der Population ist von der Formulierung der Fragestellung abhängig und daher nicht immer leicht zu konstatieren. So ist es vorstellbar, dass die Untersuchungsmenge räumlich endlich ist, jedoch ohne eine Festlegung eines Untersuchungszeitraums bleibt. Dann ist der Aufwand von der Zeit der Erhebung abhängig und kann für die Grundgesamtheit mit einem enormen Aufwand verbunden sein (BAHRENBURG et al., 2010: 19, MOSSIG, 2012: 2).

Man kann zwei verschiedene Prinzipien zur Festlegung einer Stichprobe unterscheiden. Einerseits kann die Auswahl der Stichprobe nach dem Zufallsprinzip erfolgen und andererseits durch bewusste Auswahlmethoden. Da der Zeit- und Kostenaufwand ein wichtiger Faktor der Analyse ist, muss eine Methode angewandt werden, durch die der minimale aber dennoch ausreichende Stichprobenumfang ermittelt werden kann.

Im Folgenden werden einige allgemeine Grundregeln für die Bestimmung des Stichprobenumfangs aufgeführt, die unabhängig von deren mathematischen Eigenschaften betrachtet werden sollten (BAHRENBURG et al., 2010: 20 f., MOSSIG, 2012: 8):

- Generell gilt das „Gesetz der großen Zahl“, welches besagt, dass sich die Eigenschaften der Stichprobe mit wachsendem Stichprobenumfang den Eigenschaften der Grundgesamtheit annähern.
- Je stärker die Werte der untersuchten Variablen streuen, desto größer sollte der Stichprobenumfang sein.
- Stichprobenumfänge von weniger als 30 gelten allgemein als zu klein, um repräsentativ zu sein.
- Die Repräsentativität ist weniger durch den relativen Anteil der Stichprobe an der Größe der Population gekennzeichnet, als vielmehr durch die absolute Größe der Stichprobe.
- Jedes Element der Grundgesamtheit muss im Rahmen einer nach dem Zufallsprinzip organisierten Untersuchung theoretisch die Chance besitzen, in die Stichprobe zu gelangen. Die Probabilität dafür muss bekannt sein.
- Jedes Element repräsentiert die Grundgesamtheit zu gleichen Teilen

Da in dem zu validierenden Datensatz eine genaue Anzahl der Elemente in Form von Pixeln ablesbar ist, kann weiter mit dem minimal erforderlichen Stichprobenumfang für eine endliche

Grundgesamtheit verfahren werden. Dieser lässt sich nach der folgenden Formel (MOSSIG, 2012: 21 f.) berechnen:

$$n \geq \frac{N}{1 + \frac{(N-1) \varepsilon^2}{z^2 P Q}} \quad (6-4)$$

- n** = minimal erforderlicher Stichprobenumfang für eine endliche Grundgesamtheit.
N = Anzahl der Elemente in der Grundgesamtheit.
ε = gewählter tolerierter Fehler wurde auf ε = 5% festgelegt → ε = 0,05
z = aus der zentralen Wahrscheinlichkeit der Standardnormalverteilung berechneter Wert der gewählten Sicherheitswahrscheinlichkeit. (Es wurde eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% angenommen, daher muss derjenige z-Wert aus der Wertetabelle der Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung abgelesen werden. D(z) = 95% → z=1,96 (vgl. KREYZIG, 1968: 393 f.)
P = tatsächlicher Mittelwert der Grundgesamtheit bzw. prozentualer Anteilswert an der Grundgesamtheit (Es gilt 0 ≤ P ≤ 1.)
Q = 1-P. Es gilt 0 ≤ Q ≤ 1.

Die zentrale Wahrscheinlichkeit D(z) entspricht dem Flächeninhalt unter der Standardnormalverteilungsfunktion (Gauß-Funktion) zwischen den Werten -z bis z, der sich mathematisch exakt beschreiben lässt (siehe Abb. 6.2).

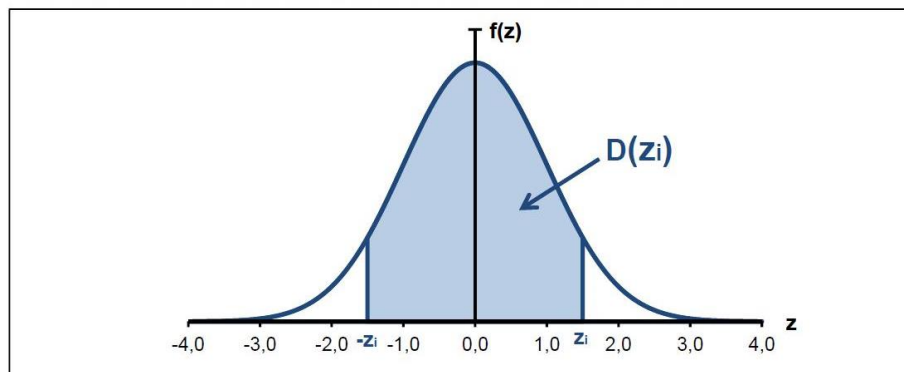


Abb. 6.2 Zentrale Wahrscheinlichkeit der Standardnormalverteilung (MOSSIG, 2012: 17).

Die Zielsetzung dieser Methode besteht darin, die Wahrscheinlichkeit, auch Sicherheitswahrscheinlichkeit genannt, mit der die empirische Untersuchung ein Ergebnis innerhalb der tolerierten Fehlerspanne hervorbringt, zu bestimmen. Daraus lässt sich der minimale Stichprobenumfang berechnen. Dabei muss berücksichtigt werden, ob eine endliche oder unendliche Population zugrunde liegt (MOSSIG, 2012: 18). Da die Grundgesamtheit in Form von endlich abzählbaren Pixeln pro Untersuchungsgebiet bekannt ist und die prozentuale Verteilung der einzelnen Klassen auf die endliche Population simpel zu errechnen ist, wurde bewusst die Berechnung des minimalen erforderlichen Stichprobenumfangs gewählt.

Die Fragestellung nach der Stichprobenanzahl formuliert sich wie folgt. Wie groß muss der Stichprobenumfang **n** gewählt werden, damit das Ergebnis mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit **D(z)** von 95% um nicht mehr als 5 Prozentpunkte (tolerierter Fehler ε = 0,05) vom tatsächlichen Ergebniswert abweicht?

Die Wahl des tolerierten Fehlers und der Sicherheitswahrscheinlichkeit wurde bewusst hoch angesetzt, um eine ausreichende Anzahl von Samples zu erhalten. Dies war notwendig, da die Untersuchungsgebiete sehr groß sind und eine Gesamtstichprobe von ca. 1150 Samples in beiden

Gebieten über alle Klassen verteilt, keinen zu großen Mehraufwand darstellt. Im Vergleich errechnet sich bei einem tolerierten Fehler von 10% und einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 90% eine Gesamtzahl an Stichproben von lediglich knapp 250 für die jeweiligen Gebiete. Die folgende Tab. 6.2 zeigt die Ergebnisse der Anzahl der Stichproben für beide Untersuchungsgebiete:

Klassifikations- ergebnis	Stichproben Untersuchungs- gebiet I	Prozentualer Anteil	Stichproben Untersuchungs- gebiet II	Prozentualer Anteil
Wasser	6	0,4 %	2	0,1 %
Dachbegrünung	8	0,5 %	8	0,5 %
Vegetation am Grund	294	25,9 %	228	18,1 %
Vegetation erhöht	280	24,2 %	316	28,9 %
Gebäude	224	17,7 %	296	26,1 %
Unklassifizierte Fläche	330	31,3 %	298	26,3 %
Gesamt	1142	100 %	1148	100 %

Tab. 6.2 Anzahl der Samples für die pixelbasierte Genauigkeitsuntersuchung der klassifizierten Ergebnisse mit den Referenzdaten der UltraCam X.

Laut CONGALTON (2001: 327), BAHRENBURG et al. (2010: 20 f.), MOSSIG (2012: 8) sollte die Anzahl pro Klasse einen Wert von 50 Stichproben nicht unterschreiten. In besonderen Fällen wird auch eine Anzahl von 30 als absolutes Minimum noch akzeptiert. Da die Größe des Flächenanteils der Klassen Wasser und Dachbegrünung im Vergleich zum gesamten Klassifikationsareal sehr gering ist, errechnet sich nach der oben genannten Formel eine zu geringe Stichprobenanzahl. Die Handhabung dieses Falls und die Gesamtdiskussion der Genauigkeit werden im folgenden Abschnitt thematisiert.

6.3 Durchführung und Ergebnisdiskussion der Genauigkeitsuntersuchung auf Grundlage des Luftbilddatensatzes

Für die Genauigkeitsanalyse kam in der Folge ein adaptiertes Verfahren zum Einsatz. Die zuvor ermittelte Anzahl der Stichproben für die einzelnen Klassen wurde nicht wie ursprünglich geplant auf die einzelnen Klassen übertragen. Dafür hätten alle Klassen zu einem thematischen Layer der eine vollständige Segmentierung des Bildes aufweist zusammengeführt werden müssen. Somit hätte die zuvor errechnete Stichprobenanzahl auf die jeweilige Klasse übertragen werden können und in einen visuellen Vergleich mit dem RGB-Bild abgeglichen werden können. Das in dieser Arbeit verwendete Verfahren verteilt die Gesamtanzahl aller für das jeweilige Untersuchungsgebiet ermittelten Stichproben jedoch zufällig auf den entsprechenden RGB-Datensatz und nicht auf die Klassen selber. Dadurch ist die Verteilung der Stichprobenanzahl auf die jeweiligen Klassen nicht mehr gewährleistet. Jedoch ist aufgrund der exakten Berechnung der Stichprobenanzahl, ausgehend von ihrer Klassenfläche zur Grundgesamtheit, nach obiger Formel (6-4) eine annäherungsweise Verteilung der Stichproben zu erwarten.

In diesem Verfahren wird das Referenzbild visuell mit den Klassifizierungsergebnissen verglichen. Das bedeutet, dass jeder einzelne Punkt der gesamten Stichprobenanzahl im RGB-Datensatz mit der klassifizierten Fläche nach den Regeln der in 6.1 beschriebenen Konfusionsmatrix abgeglichen wird. Die Herangehensweise ist also komplementär. Lediglich eine explizite Verteilung der errechneten Stichprobenanzahl ist nicht möglich. Die aus der objektbasierten Analyse ermittelten Gebäudeklassen, sowie die Klasse „Balkone“ wurden zu der Klasse „Gebäude“ zusammengeführt.

Dies ist darin begründet, dass bei einem visuellen Vergleich zwischen einem RGB-Luftbild und den extrahierten Objekten die Höhenstufen nicht erkennbar sind und keine Aussage getroffen werden kann, ob das jeweilige Gebäude tatsächlich der richtigen Höhe und damit der richtigen Klasse zugeordnet werden konnte.

Die Untersuchung der Typisierungsgenauigkeiten von Gebäuden wurde im Abschnitt 6.4 beschrieben. Korrekt identifizierte Dachbegrünung schließt immer mit ein, dass ein Gebäude getroffen wurde. Sie wird dennoch nur als Dachbegrünung eingetragen, da keine doppelte Zuweisung eines Pixels erfolgen kann. Die Klassen „Wasser“ und „Dachbegrünung“ sind wie in Kapitel 6.2 erwähnt in der Anzahl der Stichproben unterrepräsentiert und liefern somit keine aussagekräftigen Ergebnisse die Genauigkeit betreffend. Aufgrund des verwendeten Verfahrens lässt sich die Stichprobenanzahl von 30 als absolutes Minimum nicht einhalten. Nur durch eine enorme Erhöhung der Gesamtanzahl der Stichproben ist die minimale Population erreichbar. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Wasserfläche im RGB-Datensatz auszuschneiden und dann mit den nötigen Stichproben und der Wassermaske zu vergleichen. Da dieses Vorhaben jedoch für Dachbegrünung aufgrund der Verteilung über den gesamten Datensatz nicht möglich war, ist auch aufgrund des geringen Klassifikationsanteils der beiden Flächen davon abgesehen worden.

Um eine einhundert prozentige Abdeckung der Klassifizierungsergebnisse zu erhalten, wurden die nicht in der OBIA extrahierten Flächen zu der Klasse „Unklassifizierte Fläche“ zusammengefasst. Alle weiteren Klassen wurden nicht verändert. Im weiteren Verlauf wurden die einzelnen Layer als Shape-Dateien über das Referenzbild gelegt und die Samples nacheinander abgeglichen sowie in die folgenden Konfusionsmatrizen (siehe Tab. 6.3 für das Untersuchungsgebiet I und Anhang Tab. 6.A.1 für das Untersuchungsgebiet II) überführt. Die Ergebnisse beider Tabellen zeigen deutlich, dass die errechnete Stichprobenanzahl mit den in der Konfusionsmatrix ermittelten Werten nahezu übereinstimmt. Somit ist eine akkurate Genauigkeitsvalidierung der Klassen „Gebäude“, „Vegetation erhöht“, „Vegetation am Grund“ und der unklassifizierten Fläche gegeben. Die Tab. 6.3 zeigt das Ergebnis der Genauigkeitsanalyse der aus der OBIA ermittelten Klassen im Vergleich zu dem für die Klassifizierung verwendeten Luftbilddatensatz.

	Wasser	Dach- begrün- ung	Gebäude	Vegetation erhöht	Vegetation am Grund	Unklassi- fizierte Fläche	Zeilen- summe
Wasser	7						7
Dachbegrünung		6		2			8
Gebäude		1	199	16	18	7	241
Vegetation erhöht		2	8	263	10	5	288
Vegetation am Grund	1		15	7	246	25	294
Unklassifizierte Fläche	2		32	9	30	231	304
Spaltensumme	10	9	254	297	304	268	1142
Hersteller- genauigkeit	70 %	66,7 %	78,3 %	88,5 %	80,9 %	86,2 %	
Nutzergenauigkeit	100 %	75 %	82,6 %	91,3 %	83,7 %	80,2 %	

Gesamtgenauigkeit: 83,4%

Tab. 6.3 Resultate der Genauigkeitsuntersuchung der aus der OBIA klassifizierten Ergebnisse im Vergleich zum Luftbilddatensatz aus dem Untersuchungsgebiet I in Form einer Konfusionsmatrix.

Da, wie im Kapitel 6.2 angesprochen, die Stichprobenanzahlen für die Klassen „Wasser“ und „Dachbegrünung“ unzureichend sind, ist die Hersteller- und Nutzergenauigkeit vage. Für Gebäude

ergibt sich mit 78,3% ein gutes Ergebnis bezüglich der Herstellergenauigkeit und 82,6% des klassifizierten Ergebnisses stimmen mit dem Referenzdatensatz überein (Nutzergenauigkeit). Die Fehler ergeben sich insbesondere in Gebieten mit einer niedrigen Bebauungshöhe, da Gebäude mit einer Höhe unter 2,8 Meter nicht als solche erfasst werden (siehe Kapitel 5.1). Vegetation, die Gebäude verdeckt kann ebenfalls eine Ursache für Fehlklassifizierungen sein. Aber auch Interpolationsfehler im Oberflächenmodell können zu einer fehlerhaften Klassifizierung führen. Sehr gute Ergebnisse konnten in der Klasse „*Vegetation erhöht*“ und „*Vegetation am Grund*“ erzielt werden. Die unklassifizierten Elemente sind mit einer sehr guten Herstellergenauigkeit und einer guten Nutzergenauigkeit erfasst worden. Das bedeutet, sie wurden bewusst nicht erfasst und zeigen somit, dass im Gesamtergebnis nur wenig Flächen falsch klassifiziert wurden. Mit einer Gesamtgenauigkeit von 83,4 % ist das Ergebnis der Genauigkeitsüberprüfung als sehr gut einzustufen.

Da die Ergebnisse im Untersuchungsgebiet II dieselbe Gesamtgenauigkeit aufweisen und nur kleinere Abweichungen in den einzelnen Klassen entstehen, wird an dieser Stelle nicht weiter auf diese Ergebnisse eingegangen. Die den Ergebnissen zugrundeliegende Konfusionsmatrix ist dem Anhang Tab. 6.A.1 zu entnehmen.

Um die Problematik der unzureichenden Stichprobenzahl für Wasserflächen und Dachbegrünung zu vermeiden, empfiehlt es sich für künftige Arbeiten, eine weiterführende Genauigkeitsuntersuchung der aus der OBIA hervorgegangenen Klassen z.B. auf der Grundlage von der Software ERDAS Imagine 2014 (Earth Resource Data Analysis System) durchzuführen. Das Tool Accuracy Assessment bietet die Möglichkeit die Klassifizierungsergebnisse als thematische Layer einzubinden und jeder Klasse eine definierte Anzahl an Stichproben zuzuweisen.

6.4 Vergleich der Klassifikationsergebnisse mit den Gebäudegrundrissen des amtlichen Liegenschaftskatasters

Die zentrale Fragestellung dieses Abschnittes ist der Vergleich der ermittelten OBIA- Datensätze mit den in der ALK erhobenen Daten. Für den in der Folge ausgeführten Vergleich werden Daten der ALK von 06/2012 verwendet. Sie stammen von der SenStadtUm und liegen wie die zur objektbasierten Klassifikation verwendeten Rasterdaten in ETRS89/UTM33 vor. Die Daten wurden für die Validierung der Genauigkeit der Klassenzuordnung der Gebäudetypisierung vom DLR-Institut für Verkehrsforschung, Berlin- Adlershof zur Verfügung gestellt. In der ALK sind die Objekte mit einem Objektschlüssel versehen. Dieser Schlüssel ermöglicht die Verknüpfung mit bestimmten Attributen von Objekten. In deren Attributtabelle sind die maximale Geschossanzahl der Gebäude sowie deren Fläche in m² und deren Nutzung (Beschreibung) vermerkt. Letztere kann aber aufgrund mangelnder Vergleichbarkeit mit den hier erhobenen Daten nur bedingt bis nicht verwendet werden. Das erklärt sich z. B. aus der Vielzahl der in der ALK zusammengefassten nutzerbedingten Objektklassifizierungen (215 Objektklassen). Diese nutzungsbezogenen Objektarten enthalten Beschreibungen wie Gaststätte, Kühlhaus, Schleuse oder Pumpstelle, um nur einige zu nennen, die aus fernerkundlichen Daten nicht oder höchst eingeschränkt ableitbar sind. Problematisch für den gesuchten Bezug sind auch Wohngebäude, die sich neben ihrer Wohnfunktion in der nutzungsbezogenen Beschreibung abbilden. So existieren beispielsweise Klassen wie Wohngebäude mit Gewerbe und Industrie. Sie sind von Objekten mit ausschließlicher Wohnfunktion fernerkundlich nicht unterscheidbar. Einzelhäuser, Doppelhäuser, Hochhäuser und andere in der ALK ausgewiesene Klassen hingegen sind prinzipiell zuordenbar. Dennoch ergeben sich auch hier in verschiedenen Fällen Inkonsistenzen im Vergleich, die durch die ALK Zuweisung

entstehen. Gebäude mit einer Mischung aus Wohnung und gewerblicher Nutzung können z. B. nach dem Stand 06/2012 schon nach kurzer Zeit einem anderen Nutzen zugeführt sein, als er in der ALK deklariert wird. Im folgenden Beispiel (Abb. 6.3) wird anhand der Hochhausklasse veranschaulicht, wie ein baugleiches Hochhaus mit 21 und 18 Etagen in der ALK aufgeführt wird und welche Interpretationsfehler dabei auftauchen können. Der rote Kreis markiert das Hochhaus mit 21 Etagen, der blaue Kreis das Hochhaus mit 18 Etagen. Weiterhin ist der Beschreibung zu entnehmen, dass das Hochhaus als Wohnblock in geschlossener Bauweise aufgeführt wird.

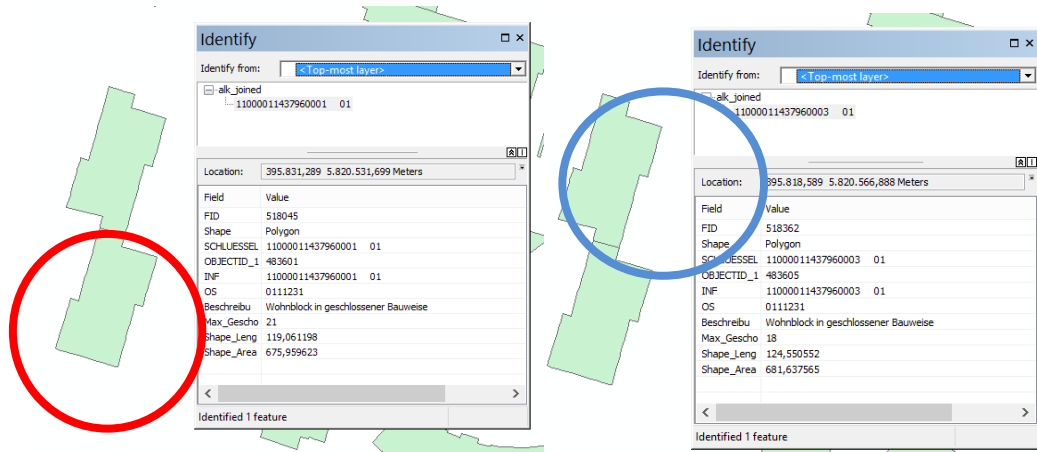


Abb. 6.3 Beispiel für die Attribuierung eines Gebäude in der ALK (vgl. Abb. 6.5, links).



Abb. 6.4 Hochhaus aus Abb. 6.3 (Quelle: Google Earth).

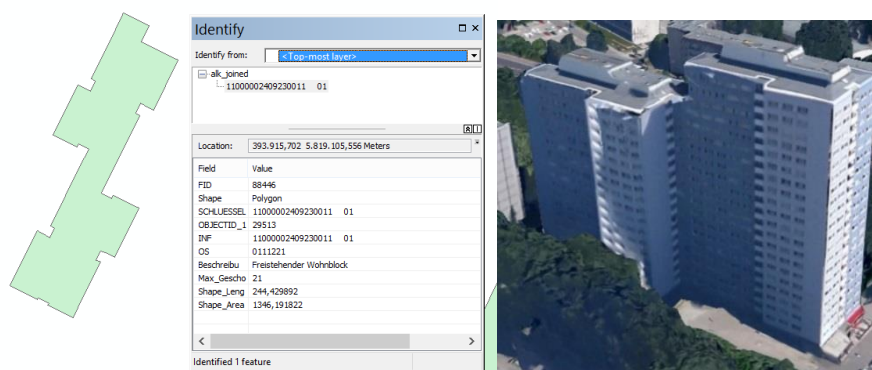


Abb. 6.5 Attribuierung des Rechts gezeigten baugleichen Gebäudes in der ALK (vgl. 6.3 und 6.4).

Das Beispiel führt zwei völlig baugleiche und nutzungsgleiche Hochhäuser der Wohnbauserie WHH 18/21 (BUNDESMINISTERIUM FÜR RAUMORDNUNG: 4ff.) der DDR auf (siehe Abb. 6.4 und 6.5 rechts). Der Abb. 6.3 ist zu entnehmen, dass es sich bei dem Hochhauskomplex um zwei voneinander separierte Gebäuden handelt. Die jeweilige Geschosshöhe wird korrekt abgebildet. Deren Nutzen wird in der Beschreibung als Wohnblock in geschlossener Bauweise aufgeführt. In

der Abb. 6.5 hingegen ist der gleiche Hochhaustyp WHH 18/21 als ein zusammenhängender Block verzeichnet. Sie werden als ein Haus mit der höchsten Geschosszahl angezeigt, obwohl das Bild (rechts) eindeutig zeigt, dass es sich von der Morphologie des anderen Hauses unterscheidet. Ebenso ist die Beschreibung des Nutzens als freistehender Wohnblock von dem in Abb. 6.3 verwendeten abweichend. Die maximale Geschosszahl wird mit 21 Etagen aufgeführt.

Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass weder die Beschreibung der Objektart noch das daraus ableitbare Volumen des Gebäudes im Hinblick auf die maximale Geschossanzahl übereinstimmen. Ein anderes bekanntes Beispiel ist der Gebäudekomplex rund um den „Treptower“, der aus einem flachen Gebäudeteil unter 40 m und einem Büroturm mit ca. 120m höhe besteht. In der ALK wird dieser als ein Gebäudeobjekt geführt. Daraus wird ersichtlich, dass der Vergleich der aus der objektbasierten Klassifikation gewonnen Gebäudeklassen mit denen aus der ALK nicht im strengen Sinne einer Genauigkeitsüberprüfung durchführbar ist.

Dennoch werden die ALK-Angaben der maximalen Geschosszahl und der Grundrissfläche für die folgende Analyse genutzt. Sie lassen einen Vergleich zu, der als grobe Orientierung für die Genauigkeit herangezogen werden kann. Daher werden diese Maße mit den in der Arbeit abgeleiteten Klassen der OBIA verglichen. Da für diese Arbeit kein anderer Referenzdatensatz zu Verfügung stand, waren diese Größen die einzige unabhängige Vergleichsquelle für die Genauigkeitsanalyse.

Bei der Verwendung der ALK-Attribute: maximale Geschosszahl und Grundrissfläche treten bei Vergleich mit den Luftbilddaten zusätzliche Komplikationen auf. Eines dieser Probleme sind Dachüberstände. Laut dem Gesetz über das Vermessungswesen in Berlin ist nach dem dritten Teil, Liegenschaftskataster §15 Abs. 3 aufgeführt, dass Flurstücke und die Gebäude mit ihren Bezeichnungen, ihren Begrenzungen, ihren Flächen, ihren Nutzungen und ihrer Lage nachzuweisen sind (GESETZ ÜBER DAS VERMESSUNGSWESEN BERLIN, 1996). Das bedeutet, dass in der ALK zwar Gebäudegrundrisse, nicht aber die Gebäudehöhen oder deren Dachaufbauten erfasst sind. Es ist anzunehmen, dass die maximale Geschosszahl abgezählt wird und in das Liegenschaftskataster übertragen. Diese Problematik schränkt die Vergleichbarkeit beider Datensätze zusätzlich ein, wie in dem folgenden Beispiel (Abb. 6.6 und 6.7) zu sehen ist.

Wie der Abb. 6.6 zu entnehmen ist, sind die Dachüberstände nicht im Liegenschaftskataster vermerkt. Da aus der Draufsicht, Informationen unterhalb des Dachs nicht zugänglich sind, können nur die Objekte bildanalytisch extrahiert werden, die auch tatsächlich in dem Luftbilddatensatz zu dem jeweiligen Zeitpunkt vorhanden sind, wie es das rot eingefärbte Klassifizierungsergebnis in Abb. 6.7 zeigt. Zu sehen ist im Vergleich mit der obigen Abbildung, dass die Klassifikation das gesamte Dach umfasst und somit eine größere Fläche klassifiziert wird, als es in der ALK durch den Grundriss der Gebäude dargestellt wird.

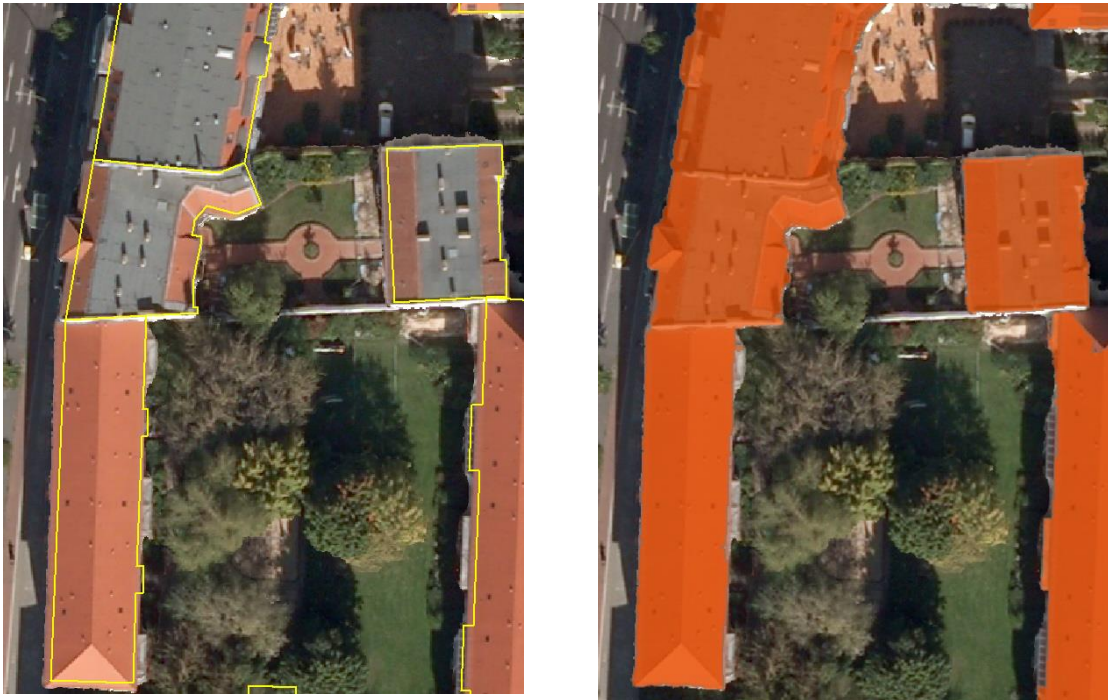


Abb. 6.6 (links): Referenzbild im Untersuchungsgebiet als TOM und darüber liegender ALK Gebäude-Layer mit den ALK-Grundrissen in gelber Umrandung zur Visualisierung der Problematik von Dachüberständen.

Abb. 6.7 (rechts): Klassifikationsergebnis für Gebäude mit Schrägdach (Rot, transparent).

Um eine annähernde Vergleichbarkeit zwischen dem ALK-Datensatz und den klassifizierten Ergebnissen herzustellen, ist es notwendig, nicht einfach nur die Geschosszahlen der ALK mit den für diese Arbeit definierten zu vergleichen und daraus die Summe der Fläche zu bilden. Es muss eine Bereinigung des Klassifizierungsergebnisses stattfinden, um einerseits zu zeigen, wieviel Anteil an der Fläche tatsächlich mit der Grundrissfläche der ALK übereinstimmt und andererseits Über- bzw. Unterklassifizierungen zu detektieren. Die Differenz aus dem Klassifizierungsergebnis und dem ALK bereinigten Klassifizierungsergebnis ergibt dann eine annäherungsweise Aussage zu Über- oder Unterklassifikationen. Diese können die Klassifikationsgüte hinsichtlich der Einteilung der Klassen mit den vorhandenen zur Validierung verwendeten Daten am besten wiedergeben.

Eine mögliche Lösung für die Problematik der Dachüberstände ist ein Buffering der klassifizierten Ergebnisse oder der Gebäudegrundrisse aus der ALK. Bei einem Buffering, oder auch Pufferung genannt, können Polygone nach außen oder innen hin um einen frei wählbaren Betrag gleichmäßig erweitert werden. Es ist damit also möglich, einen erweiterten Ring um die Gebäudegrundrisse der ALK bzw. einen invertierten Ring um die Dachüberstände aus der OBIA zu legen. Das Problem dabei ist jedoch, dass die Grundrisse der Gebäude in der ALK teilweise bündig mit dem Dach abschließen (siehe Abb. 6.8). Ein allgemeines Maß für einen positiv oder negativ angewandten Puffer hat in beiden Datensätzen nur unzureichende visuelle Ergebnisse hervorgebracht. Die Unterschiedlichkeit der Gebäudestrukturen mit oder ohne Dachüberstand ist zu groß, um ein geeignetes Maß zur die Pufferung festzulegen. Somit hätte keine annäherungsweise Aussage getroffen werden können, welche Grundrissfläche für die Validierung tatsächlich korrekt ist.

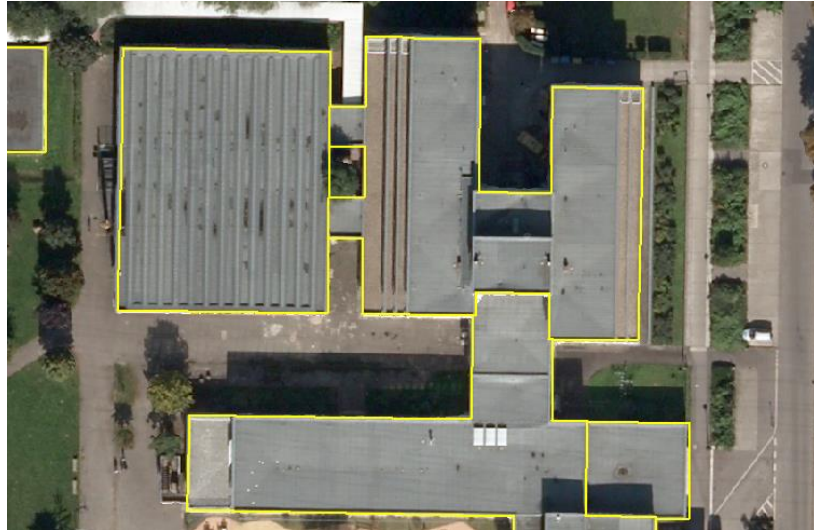


Abb. 6.8 Beispiel von Gebäudegrundrissen aus ALK-Daten (Gelb), die bündig mit dem Dach abschließen und als Referenz geeigneter sind als im Fall der Abb. 6.6.

Um den Datensatz dennoch einer Untersuchung seiner Typisierungsgenauigkeit unterziehen zu können, wurde zuerst das klassifizierte Ergebnis mit dem der ALK verglichen. Hierfür wurden die für diese Arbeit definierten Klassen nach deren Etagenzahl mit den maximalen Geschossen eines Gebäudes aus der ALK mittels SQL-Abfrage in GIS gegenübergestellt. Das bedeutet, für die Klasse „Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen“ wurde der ALK-Datensatz mit den jeweiligen Geschossen acht, neun und zehn ermittelt und die sich aus den selektierten Ergebnissen ergebende Fläche in m^2 anschließend aufsummiert. Im Fall von Einfamilienhäusern, Gebäuden mit spezieller Nutzung und Gebäuden unter 3 Etagen wurde zusätzlich eine Abfrage der Flächengröße mit einbezogen, so wie diese nach den Klassifizierungseinstellungen der OBIA abgeleitet wurden. Dadurch konnte eine Unterscheidung dieser Klassen gewährleistet werden. Die Klasse „Spitzdach zwischen 3 bis 5 Etagen“ und die Klasse „Flachdach zwischen 3 bis 7 Etagen“ wurden für diese Untersuchung zu der Klasse „Gebäude zwischen 3 bis 7 Etagen“ zusammengefasst. Dieser Schritt war notwendig, da in der ALK eine solche Unterscheidung des Dachtyps nicht getroffen wird, die Gebäude sich jedoch hinsichtlich ihrer Klassenzuordnung innerhalb derselben Geschosshöhen befinden. Somit kann ein erster Überblick über die prozentuale Übereinstimmung getroffen werden

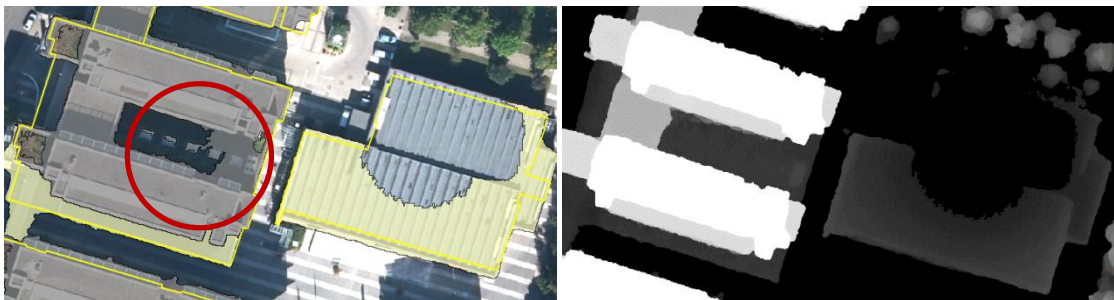


Abb. 6.9 Links: Klassifikationsergebnis im Untersuchungsgebiet I: Beispiel eines Gebäudekomplexes mit einer Überklassifizierung (links, roter Kreis) und Unterklassifizierung (rechts); Gelb: ALK-Gebäudegrundrisse.

Rechts: nDOM.

Die linke Seite der Abb. 6.9 zeigt einen Gebäudekomplex (rechts). Aufgrund von Interpolationen bei der nDOM Generierung sind auf Teilen der rechten Dachfläche keine Höhenangaben zu entnehmen. Somit kommt es zu einer fehlerhaften Klassifizierung des Gebäudes, da dieses nicht

nach dem Klassifizierungsschema detektiert werden kann. Schattenflächen können einen Einfluss auf die Qualität des generierten DOM ausüben, da bei zu wenig korrespondierenden Punkten die Höhen interpoliert werden (POZNANSKA & BAYER, 2014: 18). Dadurch sind Fehler wie auf dem rechten Gebäudekomplex nicht zu vermeiden und sind der Datengrundlage geschuldet. Auf der linken Seite ist dahingegen ein Überklassifizierungsfehler zu erkennen (roter Kreis), da diese Fläche eigentlich einer anderen Höhenstufe (Gebäude unter 3 Etagen) zugeordnet werden sollte, aber jetzt der Klasse Flachdach zwischen 3 bis 7 Etagen angehört. In gelber Umrandung sind die Gebäudegrundrisse der ALK dargestellt. Da die gelb dargestellte Klasse der Gebäude unter 3 Etagen im linken Gebäudekomplex zwar korrekt ermittelt wird, in der ALK aber mit der Gebäudeklasse Flachdach zwischen 3 bis 7 Etagen geführt wird, ergeben sich Inkonsistenzen. Addiert man die Flächen miteinander, ergibt sich die relative Fläche, die der des rechten Gebäudes entspricht. Somit wird eine hundertprozentige Übereinstimmung dieses Gebäudes suggeriert, obwohl eindeutige Fehler zu verzeichnen sind. Währenddessen sind im rechten Gebäude Unterklassifizierungen zu verzeichnen. Das Beispiel verdeutlicht, dass eine Aussage über die Genauigkeit der Klassifizierung im allgemeinen nicht möglich ist, da die klassifizierten Ergebnisse lediglich über ihre Fläche mit den ALK-Daten abgeglichen werden. Weiterhin beeinflussen die Unterschiede der Geschosshöhen in der Realität die Klassifizierungshierarchie stark und lassen einen Vergleich nur anhand der eigentlichen Gebäudehöhe zu, die als Referenzdatensatz nicht zur Verfügung steht. In der folgenden Tab. 6.4 ist das Ergebnis des Vergleichs zwischen dem OBIA- Ergebnis und den ALK-Daten für das Untersuchungsgebiet I dargestellt.

Gebäudeklasse	Klassifikations- ergebnis in m ²	ALK Grundrissfläche in m ²	Prozentuale Überein- stimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	8.027	8.326	96,4 %
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	9.811	8.764	115,1 %
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	114.380	104.625	109,3 %
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	105.918	170.347	62,2 %
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	1.266.899	1.614.580	78,5 %
Gebäude unter 3 Etagen	951.350	606.521	156,9 %
Einfamilienwohnhaus	209.482	355.247	59 %
Gebäude mit spezieller Nutzung	525.850	254.528	206,6 %
Gesamtfläche Gebäude	3.191.717	3.122.938	102,2 %

Tab. 6.4 Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit der Grundrissfläche der ALK.

Die Tab. 6.4 zeigt, dass die gesamte Übereinstimmung von 102,2% ermittelt wird. Werte über hundert Prozent entsprechen einer Überklassifizierung, Werte darunter einer Unterklassifizierung. Da, wie im vorangegangenen Absatz beschrieben, dieser Wert nicht bedeutet, dass lediglich 2,2% der Gebäude überklassifiziert sind, kann hier nur eine Aussage über die relative Extraktionsübereinstimmung getroffen werden. Zu sehen ist, dass die Klasse der Gebäude unter 3 Etagen sowie die Klasse der Gebäude mit spezieller Nutzung eine hohe Überklassifizierung aufweisen. Einfamilienhäuser hingegen sind nur mäßig abgebildet, was darauf zurückzuführen ist, dass die Höhe der als Einfamilienhaus eingetragenen Gebäude im Liegenschaftskataster unter der für die OBIA verwendeten Gebäudedefinitionen liegt. Die Abb. 6.10 veranschaulicht die Ergebnisse aus Tab. 6.4.

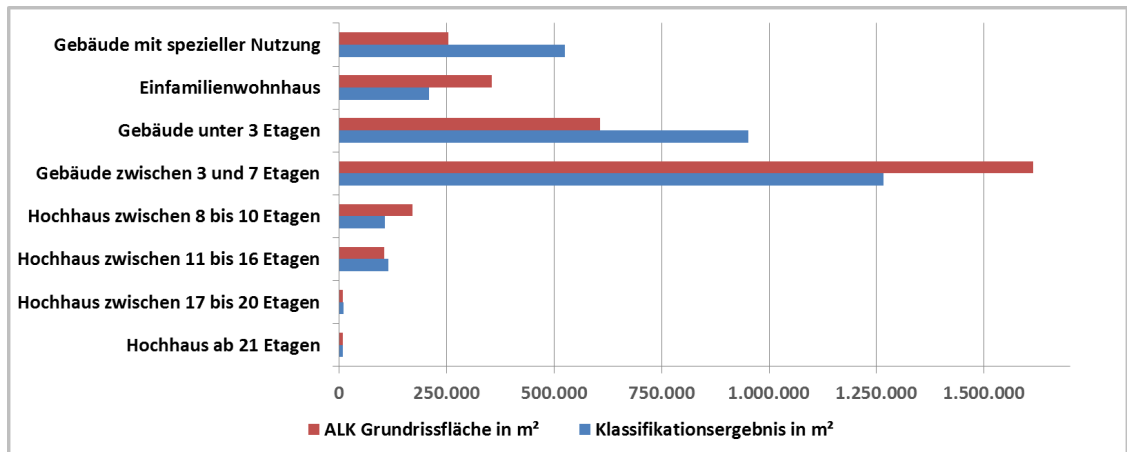


Abb. 6.10 Graphische Darstellung der Klassifikationsergebnisse mit der Grundrissfläche der ALK.

Zur weiteren Qualifikation der Analyse, wurde im Folgenden eine Bereinigung des Klassifikationsergebnisses mit Hilfe der Grundrissfläche der ALK vorgenommen. Dies bedeutet jedoch, dass korrekt klassifizierte Gebäude, die in der ALK jedoch noch nicht verzeichnet sind in der Untersuchung nicht berücksichtigt werden. D.h. die via SQL-Abfrage ermittelte Selektion der ALK-Gebäude wurde mit dem Klassifikationsergebnis verschnitten. So konnten fehklassifizierte Ausreißer gänzlich eliminiert werden. Ebenso wurden dadurch auch die Dachüberstände abgeschnitten. Die nun übriggebliebenen Polygone lassen sich bezüglich der Korrektheit ihrer Fläche auf der Ebene der jeweiligen Etage besser vergleichen. Somit lässt sich eine Aussage darüber treffen, wie genau Gebäude auf ALK-Ebene erfasst werden. Dennoch ist dieser Vergleich auch noch nicht hinreichend. Das ist darin begründet, dass die Vergleichbarkeit von Klassifikationen aus Fernerkundungsdaten mittels eines TOM zu ALK-Grundrissdaten nur bedingt gegeben ist, wie die eben diskutierten Beispiele (Dachüberstand) belegen.

Die Tab. 6.5 zeigt die Ergebnisse nach der Verschneidung mit den Grundrissflächen des Liegenschaftskatasters.

Gebäudeklasse	Bereinigtes Klassifikationsergebnis nach ALK in m²	ALK Grundrissfläche in m²	Prozentuale Übereinstimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	8.027	8.326	96,4 %
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	8.522	8.764	97,2 %
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	101.388	104.625	96,9 %
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	93.759	170.347	55 %
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	1.210.279	1.614.580	75 %
Gebäude unter 3 Etagen	541.618	606.521	89,3 %
Einfamilienwohnhaus	161.477	355.247	45,5 %
Gebäude mit spezieller Nutzung	230.848	254.528	90,7 %
Gesamtfläche Gebäude	2.355.918	3.122.938	75,4 %

Tab. 6.5 Gegenüberstellung der ALK-bereinigten Klassifikationsergebnisse mit der ALK-Grundrissfläche.

In der Tabelle 6.5 wird deutlich, wieviel Prozent der Fläche des bereinigten Klassifikationsergebnisses im Vergleich zu den ALK-Gebäudegrundrissen unterklassifiziert ist. Die prozentuale Genauigkeit zeigt, dass jetzt keine Überklassifizierung mehr auftritt, sondern nur

noch Aussagen über fehlende Klassifizierungen getroffen werden. In den erhöhten Klassen „Hochhaus ab 21 Etagen“, „Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen“ und „Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen“ sind die Übereinstimmungen sehr gut. Dies ist damit zu begründen, dass Hochhäuser meist einzeln stehende Gebäudekomplexe sind, die hinsichtlich der Morphologie ihrer Dachaufbauten einfach strukturiert sind. Es sind oft Flachdächer ohne komplexe Aufbauten, die sich aufgrund ihrer Höhe vom restlichen Umfeld gut absetzen und nur selten von Schatten anderer Gebäude getroffen werden. Klassifizierungsfehler durch angrenzende Gebäude anderer Klassen sind auf ein Minimum beschränkt. Ebenfalls kann es vorkommen, dass zwei sich angrenzende Klassen durch Bereinigungsabfragen in eine der jeweiligen Klassen überführen werden. Diese Anomalien können an Übergängen auftauchen, bei denen die tatsächliche Höhe eines Gebäudes im Referenzdatensatz genau zwischen der in der OBIA definierten Höhe zweier Klassen liegt.

Es wird ebenfalls ein sehr gutes Ergebnis bei Gebäuden von unter 3 Etagen und Gebäuden mit spezieller Nutzung erzielt. Nach dem Bewertungsschema von LANDIS & KOCH (1977: 159-174) konnte auch ein gutes Klassifikationsergebnis bei Gebäuden zwischen 3 bis 7 Etagen erreicht werden. Das Gesamtergebnis kann mit einer Klassifizierungsabdeckung von 75,4% ebenfalls als gut bezeichnet werden. Eher mäßig sind die Extraktionsgenauigkeiten bei Hochhäusern zwischen 8 und 10 Etagen sowie Einfamilienhäusern.

Zusammenfassend ist deshalb zu konstatieren, dass in niedrigeren Lagen, Bäume die tatsächliche Struktur eines Daches mitunter vollständig verdecken können und daher ein Gebäude darunter auch nicht zu identifizieren ist (siehe Abb. 6.11). Dies ist neben den Schatten und Interpolationsfehlern die häufigste Ursache für eine Unterklassifizierung in Fernerkundungsdatensätzen während der Vegetationsperiode. Die Abb. 6.12 visualisiert die Tabelle 6.5.



Abb. 6.11 Beispiel für Dachstruktur verdeckende Objekte (hier Bäume), sowie Schattenflächen, Fehler im Oberflächenmodell und Klassifizierungseinstellungen, die Extraktionsfehler hervorrufen.

Abb. 6.11 zeigt, dass Bäume, die eine Dachstruktur verdecken, eine Extraktion des Gebäudes nicht ermöglichen (gelbe Umrandung stellt Gebäudegrundriss dar). Ebenfalls ist der Abbildung zu

entnehmen, dass Schattenflächen (blauer Kreis) nicht erfasst werden. Der rote Kreis veranschaulicht gleich zwei Problemfälle. Im linken Grundriss wird das Gebäude fast vollständig verdeckt und kann somit nicht extrahiert werden. Im rechten ist keine Extraktion erfolgt, weil das Haus im Oberflächenmodell nicht erkannt wird, oder aufgrund der Gebäudedefinition ab 2,8 m nicht auftaucht.

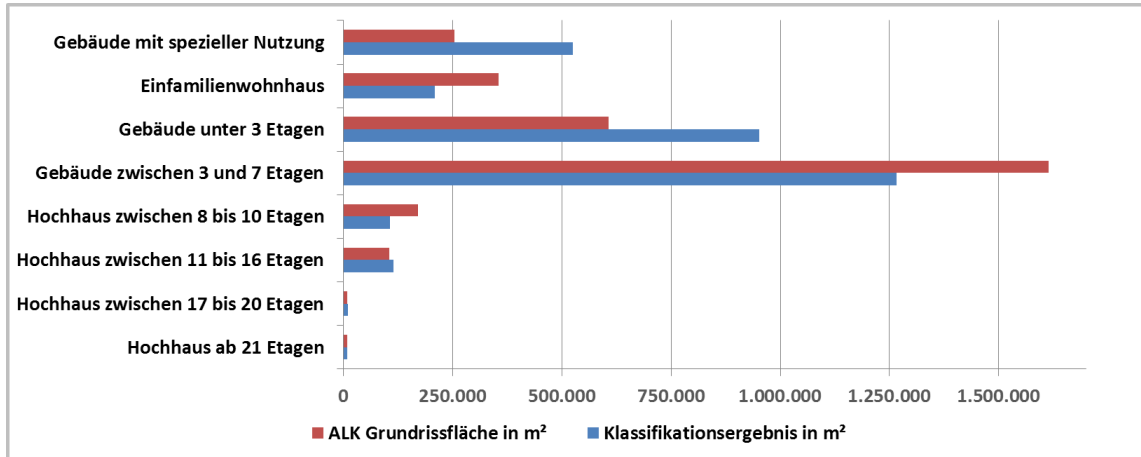


Abb. 6.12 Graphische Darstellung der Ergebnisse der Verschneidung der aus der OBIA gewonnen Gebäudeklassen und den Grundrissflächen der ALK.

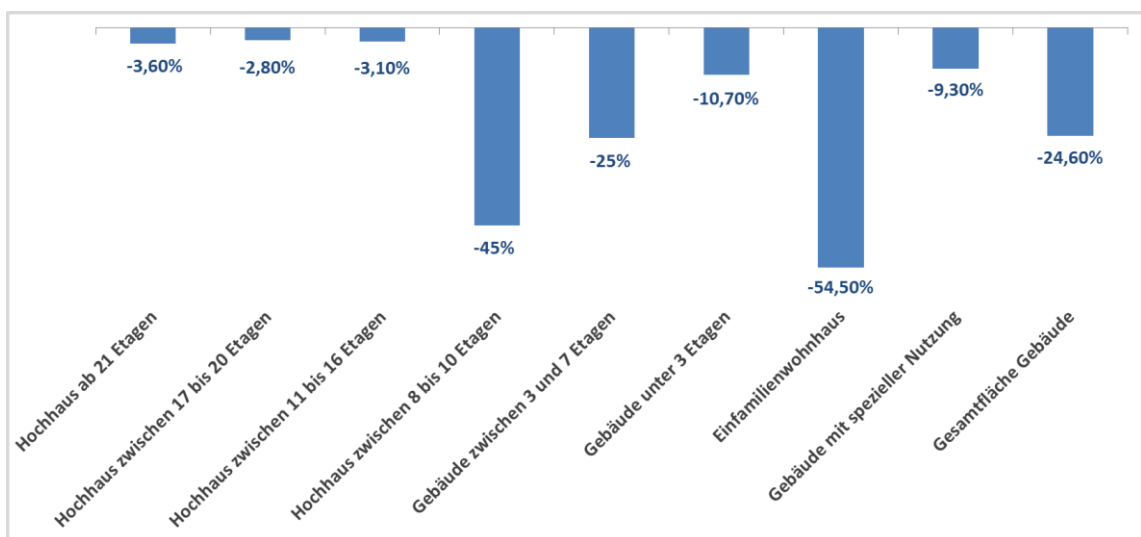


Abb. 6.13 Prozentuale Unterklassifizierung der aus der OBIA gewonnen Gebäudeklassen und den Grundrissflächen der ALK.

Die Abb. 6.13 zeigt die prozentuale Unterklassifizierung der aus der objektbasierten Klassifizierung abgeleiteten Klassen im Vergleich zu den ALK-Daten. Der Graphik ist zu entnehmen, dass besonders Einfamilienwohnhäuser (54,4% der in der ALK aufgeführten Gebäude), die der Klassifizierungsdefinition der OBIA entsprechen, nicht getroffen werden konnten.

In der folgenden Tab. 6.6 wurde das Klassifikationsergebnis dem bereinigtem gegenübergestellt.

Gebäudeklasse	Klassifikations- ergebnis in m ²	Bereinigtes Klassifikations- ergebnis nach ALK in m ²	Prozentuale Überein- stimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	8.027	8.027	100 %
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	9.811	8.522	115,1 %
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	114.380	101.388	112,8 %
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	105.918	93.759	113 %
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	1.266.899	1.210.279	104,7 %
Gebäude unter 3 Etagen	951.350	541.618	175,6 %
Einfamilienwohnhaus	209.482	161.477	129,7 %
Gebäude mit spezieller Nutzung	525.850	230.848	227,8 %
Gesamtfläche Gebäude	3.191.717	2.355.918	135,5 %

Tab. 6.6 Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit den bereinigten Ergebnissen aus dem ALK-Datensatz.

Die sich daraus ableitbaren Werte, geben noch einmal Auskunft darüber, wieviel Fläche pro Klasse in dem OBIA-Ergebnis mehr klassifiziert wird als notwendig. Der Vergleich findet auf der Ebene der Datengrundlage mit ihren Fehlern und mit den ALK verschnittenen Daten statt. Durch die Gegenüberstellung der beiden Datensätze wird es möglich, die überklassifizierte Flächen in ihrer Größe genau zu bestimmen. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass das bereinigte Klassifizierungsergebnis um 835.799 m² kleiner ist als das unveränderte aus der objektbasierten Klassifikation. Das bedeutet, dass 35,5% mehr Gebäudefläche extrahiert wird, als vorhanden sein sollte. Dabei sind die größten Fehler in den unteren Klassen zu verzeichnen. Die allgemeine Gebäudeextraktion wurde auf Grundlage eines Vegetationsindex (NDVI) erstellt. Die Definition des richtigen Schwellwertes zur Definition von Gebäude- und Vegetationsklassen erfolgt iterativ. Dabei können an Schwellwertgrenzen Fehler in der Zuordnung der jeweiligen Klassen entstehen. Exemplarisch bedeutet das, dass Bäume mit einem niedrigen Vegetationsindex genau im Wertebereich liegen können, der für Gebäude vorgesehen ist. Da gerade Bäume in denselben Höhenlagen von Gebäuden wiederzufinden sind und sehr dicht an ihnen stehen können, kann dies zu einer starken Überklassifizierung oder Fehlklassifizierung der Gebäudestruktur führen (siehe Abb. 6.14). Ohne Bereinigungsmöglichkeiten mittels eines thematischen Layers (wie in der Aufgabenstellung gefordert), der in der objektbasierten Klassifizierung direkt die Gebäudegeometrie wiedergibt, sind solche Fehler unvermeidbar. Auch die Tatsache, dass in der ALK lediglich die Gebäudegrundrisse erfasst sind, führt zu der Annahme, dass ein Großteil der Überklassifizierung auf Dachüberstände zurückzuführen ist. Jedoch muss an dieser Stelle auch erwähnt bleiben, dass „Ausfransungen“ an Dächern (bedingt durch Fehler im Oberflächenmodell) ebenso zu einer Überklassifizierung führen können (siehe Abb. 6.15). Weiterhin sind im nDOM auch Objekte mit Höhen erfasst, die in der Realität Brücken oder Verkehrsüberführungen darstellen und nicht Ziel der Erfassung sein sollen. Es wurde deshalb versucht, mittels einer Bereinigung mit Open Street Map (OSM) Vektordaten des Eisenbahnverkehrsnetzes von Berlin einen Teil dieser fehlerhaften Objekte, die mitunter eine sehr große Fläche ausmachen können, zu eliminieren (siehe Abb. 6.16). Dennoch ist zu vermerken, dass der OSM Datensatz zu viele unterschiedliche Attribute aufweist (insgesamt 21 verschiedene Arten von Verkehrswegen für das Eisenbahnverkehrsnetz), um eine genaue Verschneidung mit den zu löschenden Objekten vorzunehmen. Es konnte anhand visueller Überprüfung lediglich auf das Liniensegment „light rail“

zurückgegriffen werden. Somit kann auch keine allgemeine Aussage darüber getroffen werden, ob dieser Layer in einem erweiterten Gebiet genauso gute Ergebnisse erzielt, oder sogar Elemente löscht, die von Relevanz wären. Folglich konnten auch nicht alle Elemente die davon beeinflusst waren, gelöscht werden. Ebenso hätten andere Liniensegmente oder auch das Straßennetz von OSM dazu führen können, wesentliche Gebäudeelemente zu löschen.



Abb. 6.14 Fehlklassifizierung von Bäumen als Einfamilienwohnhäuser (Violett).



Abb. 6.15 Beispiel einer Überklassifizierung (links, siehe rot-orange eingefärbte Fläche), hervorgerufen durch Fehler im Oberflächenmodell (rechts). Der Gebäudegrundriss der ALK ist zum Vergleich in Gelb dargestellt.

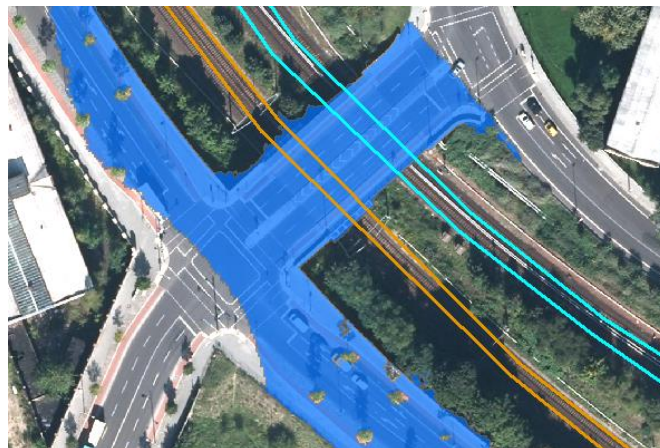


Abb. 6.16 Brückenobjekt (blau), welches im Oberflächenmodell erfasst wird und dadurch in der OBIA als Gebäude extrahiert wird.

Abb. 6.16 zeigt ein Beispiel eines Brückenobjektes, das durch die OBIA als Gebäude erfasst wird. Aufgrund der Größe dieses Objektes wurde es der Klasse „*Spezielle Nutzung*“ zugewiesen. In Weiß dargestellt ist das Liniensegment „light rail“ und in orange die Berliner Ringbahn aus dem OSM-Datensatz des Eisenbahnverkehrsnetzes.

In der Abb. 6.17 wird die Gegenüberstellung der beiden Datensätze aus der Tab. 6.6 noch einmal graphisch dargestellt. Die Abb. 6.18 zeigt die prozentuale Überklassifizierung der OBIA-Ergebnisse zu den bereinigten.

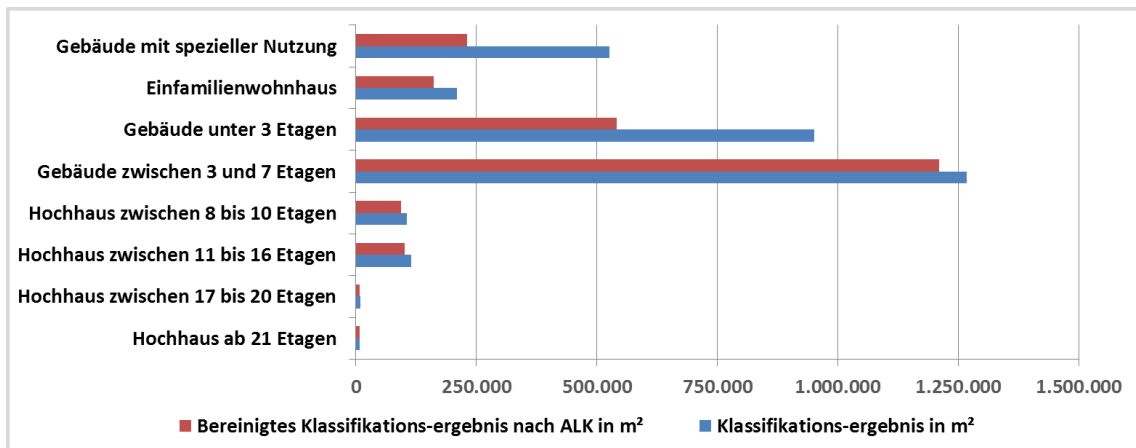


Abb. 6.17 Graphische Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit den aus der ALK bereinigten Ergebnissen.

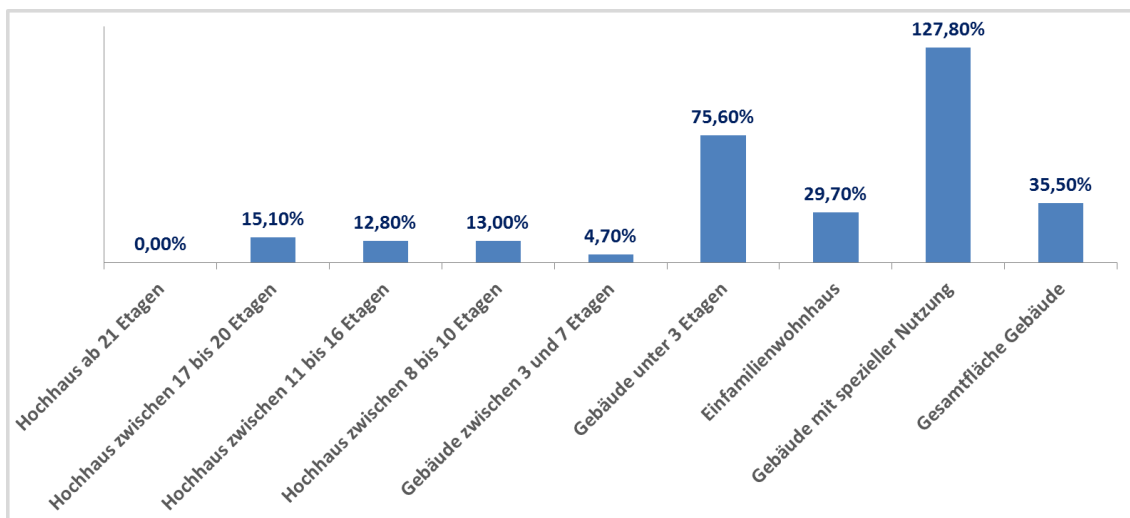


Abb. 6.18 Überklassifizierung des Klassifikationsergebnisses im Vergleich zu den aus der ALK bereinigten Ergebnissen.

Besonders die Klasse „*Gebäude mit spezieller Nutzung*“ ist mit 127,8 % stark überrepräsentiert. Dies ist auf die Höheneinteilung der Gebäude unter 3 Etagen zurückzuführen. Die Klasse selber impliziert bei einer Gebäudehöhe unter 13 Metern eine maximale Geschossanzahl von lediglich zwei Etagen. Das ist natürlich nicht immer realistisch, da theoretisch auch drei bis vier geschossige Gebäude in diese Klasse passen können, wenn man eine durchschnittliche Etagenhöhe von drei Metern annimmt. Das folgende Beispiel erläutert die Problematik. Die Klasse der Gebäude zwischen 3 bis 7 Etagen besteht aus Spitzdachgebäuden zwischen 3 bis 5 Etagen und Flachdachgebäuden zwischen 3 bis 7 Etagen. Sie werden nach der Klassenzuordnung in der OBIA im Höhensegment zwischen 13 und 25 Metern definiert. Da die Klasse der Spitzdachgebäude nach

der Annahme definiert ist, es handle sich dabei in den meisten Fällen um einen Altbau, ist die minimale Geschosshöhe von drei Etagen, bei einer durchschnittlichen Geschosshöhe von 3,5 bis 4 Metern, gut mit der minimalen Klassenhöhe von 13 Metern korreliert. Typische Dachstrukturen und Aufbauten sind inbegriffen. Die Klasse der Flachdachgebäude aber ist mit drei Etagen ab einer Höhe von 13 Metern beginnend wenig realistisch, ausgehend von einer Etagenhöhe von drei Metern. Da jedoch beide Klassen nicht voneinander zu trennen sind, musste ein Kompromiss getroffen werden, der die Klassenhierarchisierung nicht unlogisch erscheinen lässt. So hätte die Klasse der Flachbauten eine Etagenanzahl von vier bis sieben zwar besser repräsentiert, hätte aber dazu führen müssen, die Klasse Gebäude unter 3 Etagen auf unter vier anzuheben und die Klasse der Spitzdachgebäude auf 4 bis 5 Etagen. Da diese Klasseneinteilung bezüglich der minimalen Geschosshöhe von vier Etagen bei einer minimalen Höhe von 13 m unrealistisch ist, wurde davon abgesehen. Hierbei wird deutlich, dass aufgrund der schwer zu definierenden unterschiedlichen Geschosshöhen, eine Gebäudezuordnung nach Etagen nur sehr eingeschränkt möglich ist. Deshalb ist gerade bei Gebäuden mit einer Traufhöhe unterhalb von 22 Metern und mit unterschiedlichen Baustilen (Altbau vs. Neubau) eine solche Herleitung als vage zu bezeichnen. Da jedoch eine Einteilung der Klassen über reine Höhenmaße (z.B. Gebäude zwischen 13 bis 25 Metern) eine schlechte Zuordenbarkeit suggeriert, wurde weiterhin mit der Zuordnung dieser Höhenstufen nach Etagenverfahren, obwohl sich hier eindeutige Fehler verbergen. Da wie beschrieben, Höhen in dem Liegenschaftskataster nicht eingetragen werden, wird es auch immer relativ starke Abweichungen von den tatsächlichen Geschosshöhen geben. Daher muss auch immer die Gebäudehöhe in Kombination mit der definierten Geschosshöhe der Gebäudeklassen betrachtet werden. Demnach wird klar, dass hauptsächlich die Klassen im Bereich unter 25 Metern oft starke Unterschiede in der Geschosshöhe aufweisen können, während in den Klassen oberhalb von 25 Metern i.d.R. mit akkuraten Ergebnissen zu rechnen ist.

Im Folgenden werden die extrahierten, unbearbeiteten Flächen aus dem Untersuchungsgebiet I aufgelistet (siehe Tab. 6.7). Sie zeigen die Verteilung der Klassen. Jedoch ist diese Verteilung nur für die klassifizierte Objekte aussagekräftig und kein Indiz für die tatsächliche prozentuale Verteilung, da Flächen die am Boden liegen und nicht der Klasse „*Vegetation am Grund*“ zugeordnet werden, auch nicht erfasst sind. Das schließt alle versiegelten Flächen wie Straßen oder Plätze, aber auch Sand, Schutt und vieles mehr mit ein. Ebenso wie Autos und Bahnen, die diese Fläche überdecken können.

Andere Klassen	Klassifikationsergebnis in m ²
Dachbegrünung	93.872
Balkon	5.270
Vegetation am Grund	4.656.904
Vegetation erhöht	4.357.659
Wasserflächen	74.576
Gesamtfläche Gebäude	3.191.717
unklassifizierte Fläche	5.645.125

Tab. 6.7 Extrahierte Flächen der OBIA des Untersuchungsgebietes I in m² an.

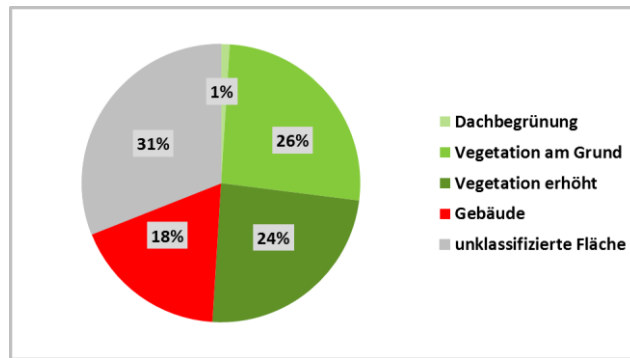


Abb. 6.19 Verteilung der durch die OBIA extrahierten Flächen. Balkon und Wasserflächen sind in dieser Darstellung wegen ihrer prozentualen Geringfügigkeit nicht ausgewiesen.

In der Abb. 6.19 wird veranschaulicht wie die extrahierten Klassen aus der OBIA verteilt sind. Interessant ist, dass rund ein Viertel der extrahierten Fläche der Klasse „Gebäude“ zuzuordnen ist, während der Rest fast ausschließlich auf Vegetation entfällt. Zuletzt kann noch ein Vergleich herangezogen werden, der die Anzahl der getroffenen Gebäude miteinander vergleicht. Im Kapitel 4 wurde beschrieben, dass einige Klassen zusammengefasst werden mussten. Dachgrenzen zwischen eng stehenden oder angrenzenden Häusern (Altbaublock) sind besonders schwer durch flächendeckende automatisierte Verfahren zu erfassen. Hierfür müssten Vektordatensätze des ALK von Anfang an in die OBIA mit eingebunden werden, um die Ergebnisse herzuleiten, was in der Arbeit aber vermieden werden sollte. Daraus wird ersichtlich, dass die vorliegende Klassifizierung die Ergebnisse aus der ALK nur bedingt reflektieren kann. Die einzelnstehenden Objekte wie z.B. Hochhäuser ab 21 Etagen sind hier gut zu erfassen gewesen. Die Tab. 6.8 veranschaulicht den Vergleich der Anzahl der Gebäude zwischen den ALK-Daten und dem Klassifizierungsergebnis.

Gebäudeklasse	Klassifikations- ergebnis / Anzahl der Gebäude	ALK / Anzahl der Gebäude	Prozentuale Überein- stimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	11	12	91,7 %
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	15	13	115,4 %
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	79	100	79 %
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	95	139	68,3 %
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	616	2.455	25,1 %
Gebäude unter 3 Etagen	1.008	643	156,8 %
Einfamilienwohnhaus	1.967	6029	32,6 %
Gebäude mit spezieller Nutzung	51	22	231,8 %

Tab. 6.8 Gegenüberstellung der Gebäudeanzahl der OBIA mit denen in der ALK verzeichneten Gebäuden.

Es ist vor allem deutlich zu sehen, wie stark die Abweichungen in den Klassen „Einfamilienwohnhaus“, „Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen“, sowie „Gebäude mit spezieller Nutzung“ sind. Da es in einer automatisierten OBIA mit einer hohen Anzahl von verschiedenen Dachmorphologien und Gebäudetypen unmöglich ist, dicht bebaute Gebiete wie Altbauquartiere nach ihren einzelnen Häuser- bzw. Dachkanten aufzulösen, war hier von vornherein eine starke Untererfassung erwartet worden. Gleiches gilt für die Klasse der Einfamilienwohnhäuser, die zwar als einzeln stehende Objekte gut voneinander abgrenzbar sind, aber die aufgrund der Höhendefinition für Gebäude in der OBIA und Fehlern im Datensatz sowie durch verdeckte

Objekte nicht oder fehlerhaft erfassbar sind. Gebäude mit spezieller Nutzung werden stark übererfasst, was erneut darauf zurückzuführen ist, dass sich die Geschossdefinition von Gebäuden mit spezieller Nutzung aus den Gebäuden unter 3 Etagen ableitet und daher bis zu einer Höhe von unter 13 Metern lediglich eine Etagenanzahl von zwei nicht überschritten werden darf. Da man bei Gebäuden mit spezieller Nutzung davon ausgehen kann, dass es sich vereinzelt um große Geschosshöhen handelt (z.B. Lagerhallen), ist diese Annahme in manchen Fällen zutreffend. Jedoch kann auch hier nur unzureichend von einem genauen Vergleich der beiden Datensätze ausgegangen werden. Der Vergleich richtet sich immer nur nach den in der OBIA definierten Geschossanzahlen für die jeweilige Klasse und ist daher aufgrund von fehlenden Höheninformationen im Liegenschaftskataster nur unzureichend.

Tabelle 6.9 stellt die Gebäudeanzahl des durch die ALK bereinigten Klassifikationsergebnisses der Anzahl der in der ALK aufgeführten Gebäude gegenüber. Das bedeutet, dass ein neuer bereinigter Vergleich hinzugezogen werden musste, um zu erkennen, wie viele Objekte tatsächlich richtig bzw. falsch klassifiziert wurden.

Gebäudeklasse	Bereinigtes Klassifikations- ergebnis / Anzahl der Gebäude	ALK / Anzahl der Gebäude	Prozentuale Überein- stimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	11	12	91,7 %
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	13	13	100 %
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	59	100	59 %
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	77	139	55,4 %
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	276	2.455	11,2 %
Gebäude unter 3 Etagen	451	643	70,1 %
Einfamilienwohnhaus	1389	6029	23 %
Gebäude mit spezieller Nutzung	20	22	90,9 %

Tab. 6.9 Gegenüberstellung der Gebäudeanzahl des bereinigten OBIA-Ergebnisses aus der ALK und dem ALK-Datensatz selbst.

Die Anzahl konnte aus dem eben erwähnten schon ALK-bereinigten Datensatz entnommen werden. Dieses Ergebnis ist in der Tab. 6.9 dargestellt. Zu sehen ist ein deutlicher Rückgang der getroffenen Gebäude. Dies erhöht jedoch teilweise die prozentuale Genauigkeit. Da für die Analyse der Attraktivitätsmaße der urbanen Wohnstandortwahl das unbehandelte Klassifikationsergebnis verwendet wird, sind die Bereinigungen nur für die relative Vergleichbarkeit angefertigt worden. So kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob überhaupt Gebäude an der richtigen Stelle klassifiziert wurden. Besonders die Ergebnisse für Einfamilienhäuser und Gebäude zwischen 3 bis 7 Etagen weichen stark von der ALK ab. Während für letztere Klasse aufgrund der Komplexität der automatisierten Extraktion von Dachgrenzen eine geringe prozentuale Übereinstimmung resultiert, ist bei der Klasse der Einfamilienwohnhäuser allen voran das Problem mit den Interpolationsfehlern zu nennen. Weiterhin ist die Gebäudegrenze ab 2,8 m definiert. Da jedoch kleine Gebäude laut der Bauordnung Berlin auch unter den für diese Klassifikation definierten Bereich von 2,8 m Höhe liegen (siehe Kapitel 5) ist eine Detektion dieser nach dem für diese Arbeit entwickelten Klassifikationsschema nicht möglich. Es scheint also schwierig, so kleine Elemente in Bodennähe adäquat zu extrahieren. Die Abb. 6.20 zeigt die prozentuale Trefferwahrscheinlichkeit des bereinigten Ergebnisses im Vergleich zu dem ALK-Datensatz.

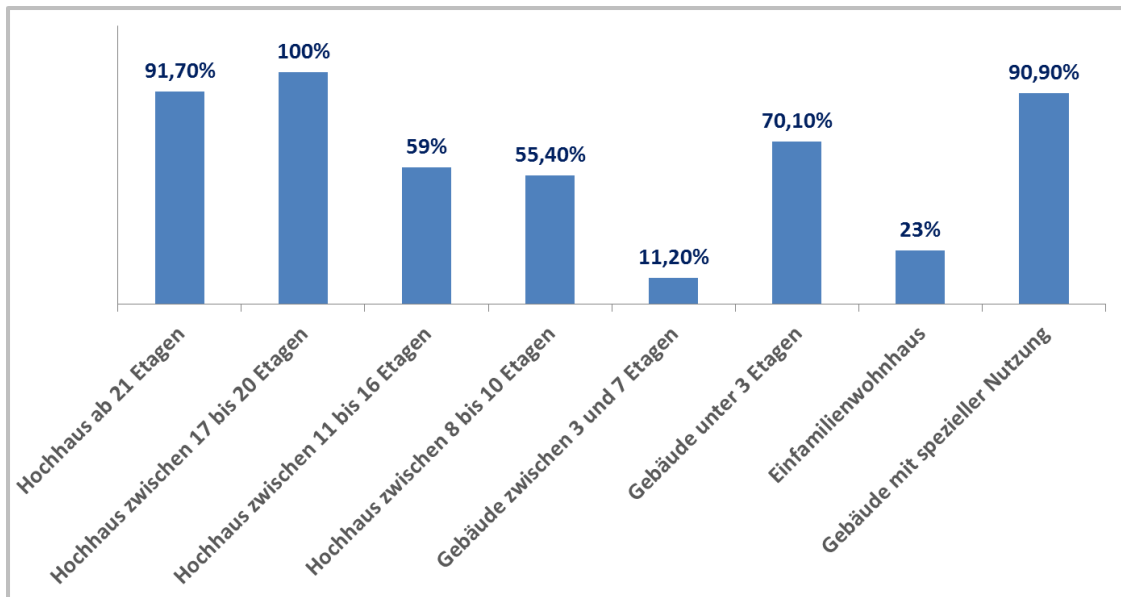


Abb. 6.20 Prozentuale Genauigkeit der Übereinstimmung des bereinigten Klassifizierungsergebnisses mit ALK-Daten.

Die Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet II sind dem Anhang 6.A zu entnehmen. Da sie in einigen Aspekten zwar leicht von den Ergebnissen aus dem Untersuchungsgebiet I abweichen, sind sie insgesamt dennoch sehr ähnlich und werden daher nicht zusätzlich thematisiert.

6.5 Bewertung der Übereinstimmung der Ergebnisse im Vergleich zu amtlichen Liegenschaftsdaten

Die Qualität des Referenzdatensatzes ließ für die vorliegende Aufgabe keine weitergehenden Verbesserungen der Genauigkeitsanalyse mehr zu. Da alle Möglichkeiten ausgeschöpft wurden und keine anderen Referenzdaten zur Verfügung standen, bot dieses Vorgehen eine gute Möglichkeit, um im Rahmen der Arbeit eine relative Übereinstimmung der Klassifizierungsergebnisse auf der Grundlage unabhängiger Referenzdaten erzielen.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass es erhebliche Probleme bei einer einheitlichen Festlegung von Geschosshöhen gibt. Um eine grobe Einteilung der Gebäudeklassen vorzunehmen, muss neben dem Maße der Gebäudehöhe auch die Geschossanzahl einbezogen werden. Die Anzahl der Geschosse kann deshalb nur als Orientierungshilfe betrachtet werden, um eine grobe Einteilung der Gebäudeklassen vorzunehmen. Für eine weiterführende Verwendung des OBIA-Datensatzes müssen für die Klassen in Abhängigkeit der jeweiligen Fragestellung auch die extrahierten Höheninformationen hinzugezogen werden, da gerade in niedrigeren Höhenstufen die Definition der Geschosshöhen alleine unzureichend ist. Ebenfalls sind fernerkundlichen Methoden Grenzen gesetzt. So ist es nicht möglich, mit einem TOM Gebäudegrundrisse zu erfassen, die von Dachüberständen überlagert werden. Außerdem verursachen Interpolationsfehler und Schattenflächen Fehler an Gebäudekanten im nDOM. Ohne Hinzunahme eines thematischen Layers (Gebäudegrundrisse) wie der des ALK, können während der OBIA Fehler nicht vermieden werden. Auch ein sehr streng festgelegter Schwellwert des für die Gebäudeextraktion verwendeten Vegetationsindex NDVI kann zu Fehlzuordnungen von Bäumen und Häusern führen. Erhöhte Klassen, wie z.B. Hochhäuser werden, grundsätzlich besser extrahiert als Klassen in niedrigeren Lagen, wie z.B. Einfamilienhäuser. Jedoch ist auch die Fläche der niedrigen Klassen erheblich größer und erhöht somit die Wahrscheinlichkeit des Auftretens

von Fehlern. Insgesamt konnten jedoch sehr gute bis gute Ergebnisse in der Klassenzuordnung erzielt werden. Damit sind sie in Kombination mit dem Wertebereich der Höhenstufen der jeweiligen Klassen aussagekräftig.

Für die Fragestellung, welchen Mehrwert die objektbasierte Klassifikationen von Gebäuden aus Fernerkundungsdaten in Relation zu amtlichen Liegenschaftsdaten bezüglich ihrer Genauigkeit haben, lässt sich folgendes festhalten. Je nach Fragestellung des Forschungszieles kann mit einem Luftbilddatensatz wie dem der UltraCam X ein sehr gutes Klassifikationsergebnis erzielt werden. Es ist ebenfalls möglich, Objekte wie Dachstrukturen und –überstände auf Gebäuden zu erfassen, die in den Liegenschaftskatastern nicht geführt werden. Jedoch ist es nicht möglich, Strukturen zu detektieren, die unterhalb des Sichtbereiches fernerkundlicher Aufnahmesysteme liegen. In Regionen ohne ein präzise geführtes Liegenschaftskataster wie in Deutschland, liefert die fernerkundliche Erfassung solide Ergebnisse und kann sogar als Grundlage für den Aufbau einer solchen Datenbank dienen. Für eine Neuerfassung von Objekten auf Grundlage eines sehr aktuellen Datensatzes liefert die fernerkundliche Erfassung im Vergleich zur terrestrischen Vermessung schnelle und zeitnahe Ergebnisse, die in Abhängigkeit des zu untersuchenden Schwerpunktes ausreichend bis sehr gute Ergebnisse erzielen.

7 Attraktivitätsanalyse der Wohnstandorte

Die Ergebnisse der automatisierten Gebäudeextraktion mittels OBIA bilden die Datengrundlage für die sich anschließende Attraktivitätsanalyse der Wohnstandorte. Die Möglichkeiten die ermittelten geometrischen Größen, die Umfelddaten der Gebäude (Vegetation, Wasser) mit Attraktivitätseigenschaften zu korrelieren, wurden im Kapitel zwei detailliert diskutiert. Dieses Kapitel verdeutlicht auch die Komplexität solcher Korrelationen vor dem Hintergrund messbarer Größen und subjektiver Bewertungen. Im Regelfall stehen für solche Analysen sorgfältig erhobene Abfrageergebnisse von Personengruppen gegenüber, die die Attraktivität bewerten und mit den messbaren Größen gespiegelt werden können. Solche Abfrageergebnisse zur Attraktivität lagen nicht vor. Es musste deshalb von den in Kapitel beschriebenen, wenigen allgemeinen und generalisierten Aussagen zur Relation von Gebäude- und Umfeldeigenschaften und deren Attraktivität für Bewohner ausgegangen werden. Diese sind in den Tabellen 2.1 und 2.2 zusammengefasst. Die folgende Attraktivitätsanalyse konzentriert sich auf das Untersuchungsgebiet I. Dieses Gebiet ist repräsentativ, weil es nahezu alle Gebäudeklassen, die im Berliner Raum auftreten, enthält. Das Untersuchungsgebiet I ist deshalb geeignet, um den allgemeinen Charakter solcher Analysen für Attraktivitätsattribuierung darzustellen und zu diskutieren.

7.1 Vorgehen zur Attraktivitätsanalyse im Untersuchungsgebiet

Im Ergebnis der objektbasierten Bildanalyse (Kapitel 5) liegen die Übersichtskarten des Untersuchungsgebietes I (TOM in RGB-Darstellung und nDOM) vor. Sie sind jeweils in den Abb. 7.1 und 7.2 gezeigt. Detailliertere Karten können für das Gros der folgenden Darstellungen für den interessierten Leser im Anhang 7.C eingesehen werden. Ebenso sei auf die digitalen Beilagen verwiesen.

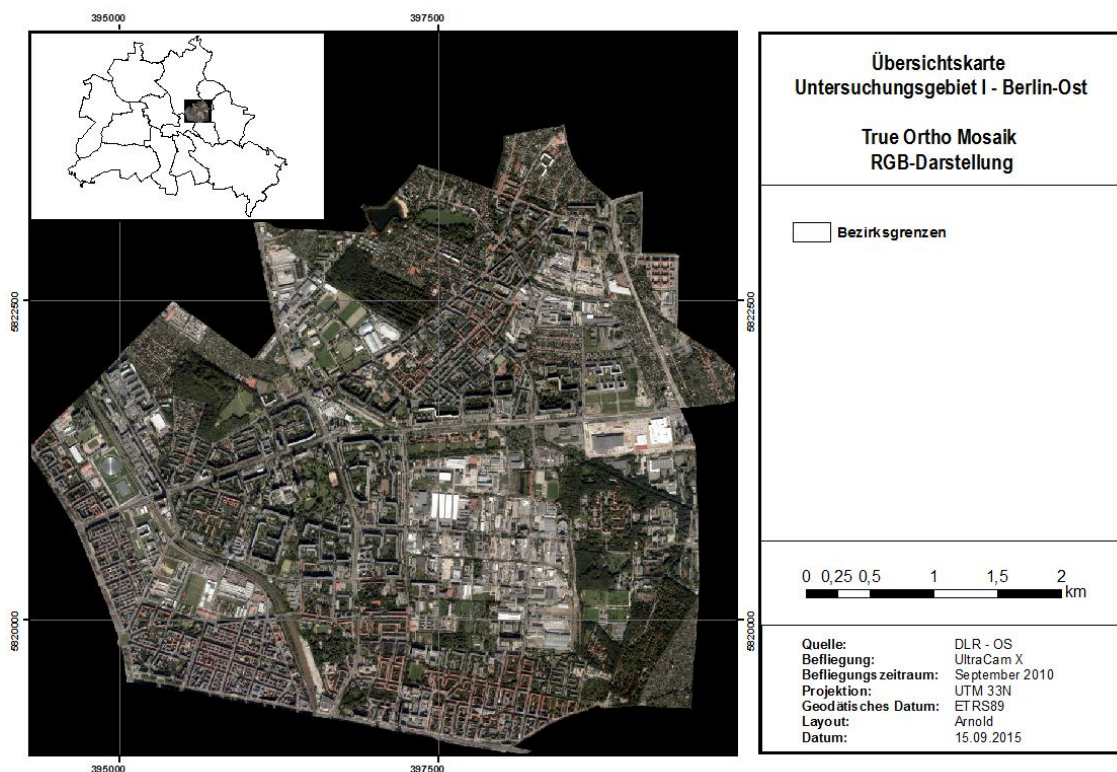


Abb. 7.1 True Ortho Mosaik, RGB-Darstellung für das Untersuchungsgebiet I.

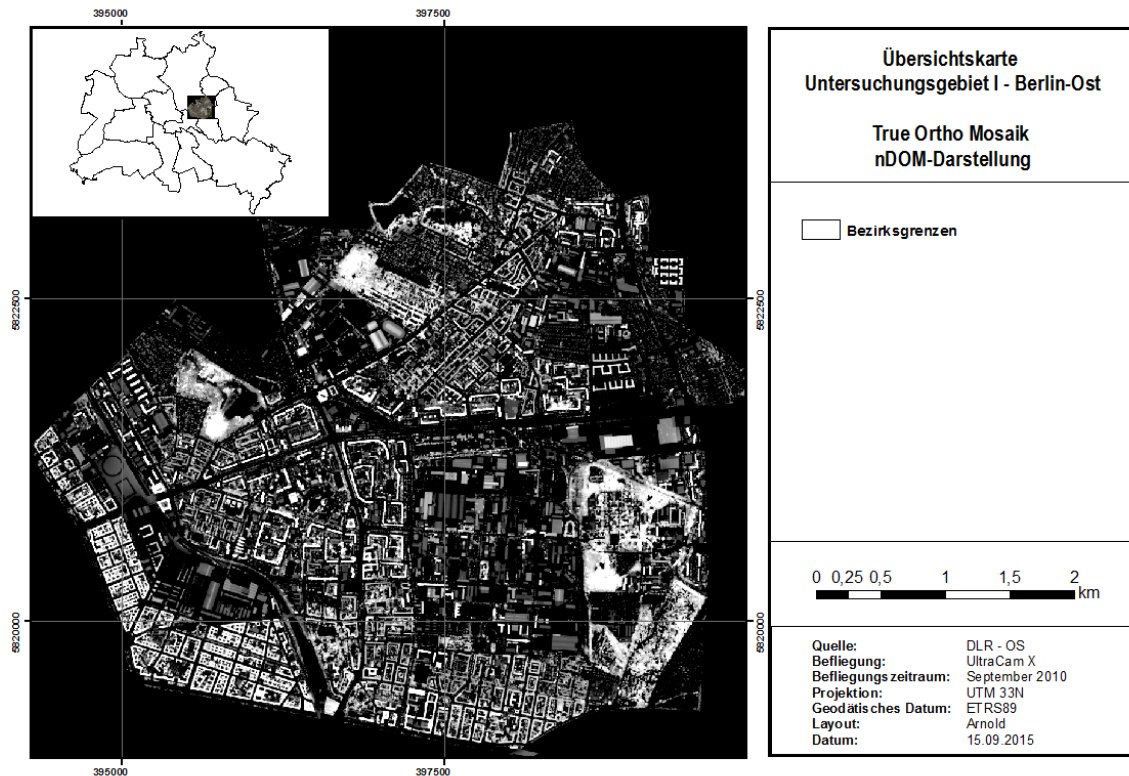


Abb. 7.2 nDOM für das Untersuchungsgebiet I.

Das Untersuchungsgebiet I ist durch eine große Heterogenität von Gebäude- und Umfeldeigenschaften gekennzeichnet. Im Kapitel 5 wird dieser Charakter beschrieben. Es treten im Untersuchungsgebiet sowohl Altbauten der Gründerzeit, Plattenbauten variabler Höhe, Gewerbe- und Industriegebäude als auch Einfamilienwohnhäuser auf. Ebenso unterschiedlich sind Vegetation und Wasser verteilt. Für eine strukturierte Betrachtung von Attraktivitätsmerkmalen wurde das Areal des Untersuchungsgebietes im ersten Schritt in Teilsegmente unterteilt. Als Unterteilungsstruktur sind die Teilverkehrszellen, Berlin (TVz) gewählt worden. Diese haben den Stand von 2014. Der Tatsache geschuldet, dass zusammenstehende Gebäudeobjekte nicht getrennt erfasst werden können, ist eine Analyse auf der Gebäudeebene nicht möglich. Ebenso ist ein Vergleich auf der Blockebene, nur anhand geometrischer Variablen, sehr umfangreich und wenig aussagekräftig. Daher wurde die Attraktivitätsanalyse auf der Ebene der

TVz aggregiert. Dies ermöglicht valide Aussagen zur Verteilung von Gebäudestrukturen und deren Umfeldparametern ohne empirische Daten hinzuziehen zu müssen. Das sind im Untersuchungsgebiet I insgesamt 41 TVz, die eine feingliedrigere räumliche Betrachtung von Attraktivitätseigenschaften und deren Variation ermöglichen. Die Abbildungen 7.3, 7.4 und 7.5 zeigen die Aufteilungen der TVz, die Ergebnisse der Gebäudeklassifikation innerhalb der TVz und die Verteilung der Vegetation in diesen. Die Zuweisung der ID der jeweiligen TVz wurde aus übersichtsgründen vereinfacht dargestellt. So ist diese üblicherweise fünfstellig. Die tatsächliche ID kann jederzeit dem jeweiligen mitgelieferten Datensatz oder für das Untersuchungsgebiet I dem Anhang 7.A.1, 7.A.2 und 7.A.3 entnommen werden.

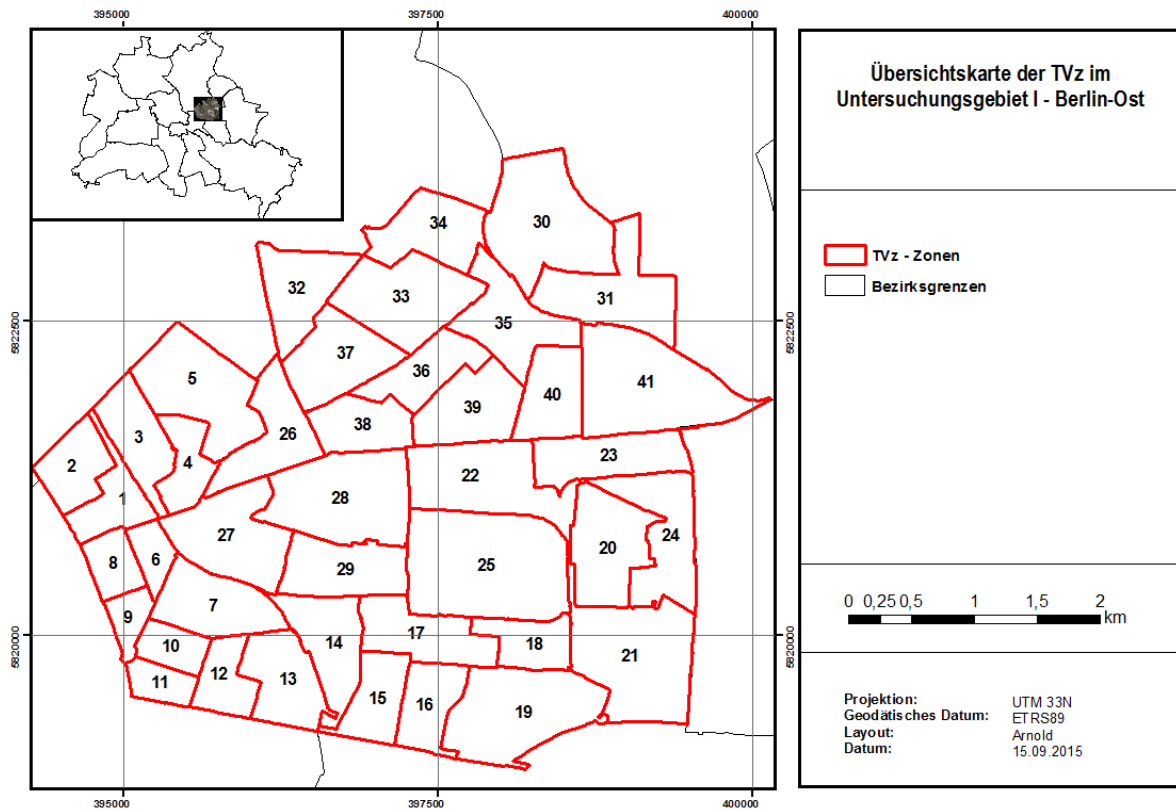


Abb. 7.3 Struktur der Teilverkehrszellen im Untersuchungsgebiet I.

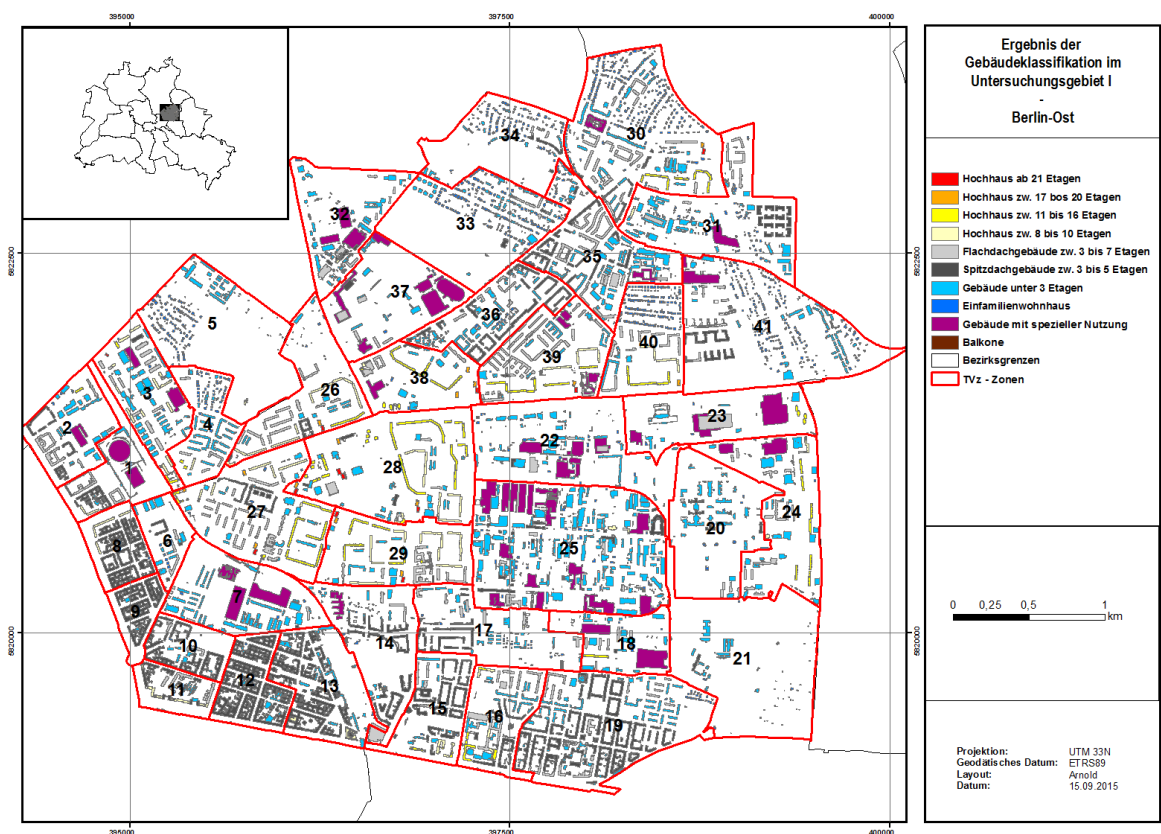


Abb. 7.4 Ergebnis der Gebäudeklassifikation im Untersuchungsgebiet I in den Teilverkehrszellen.

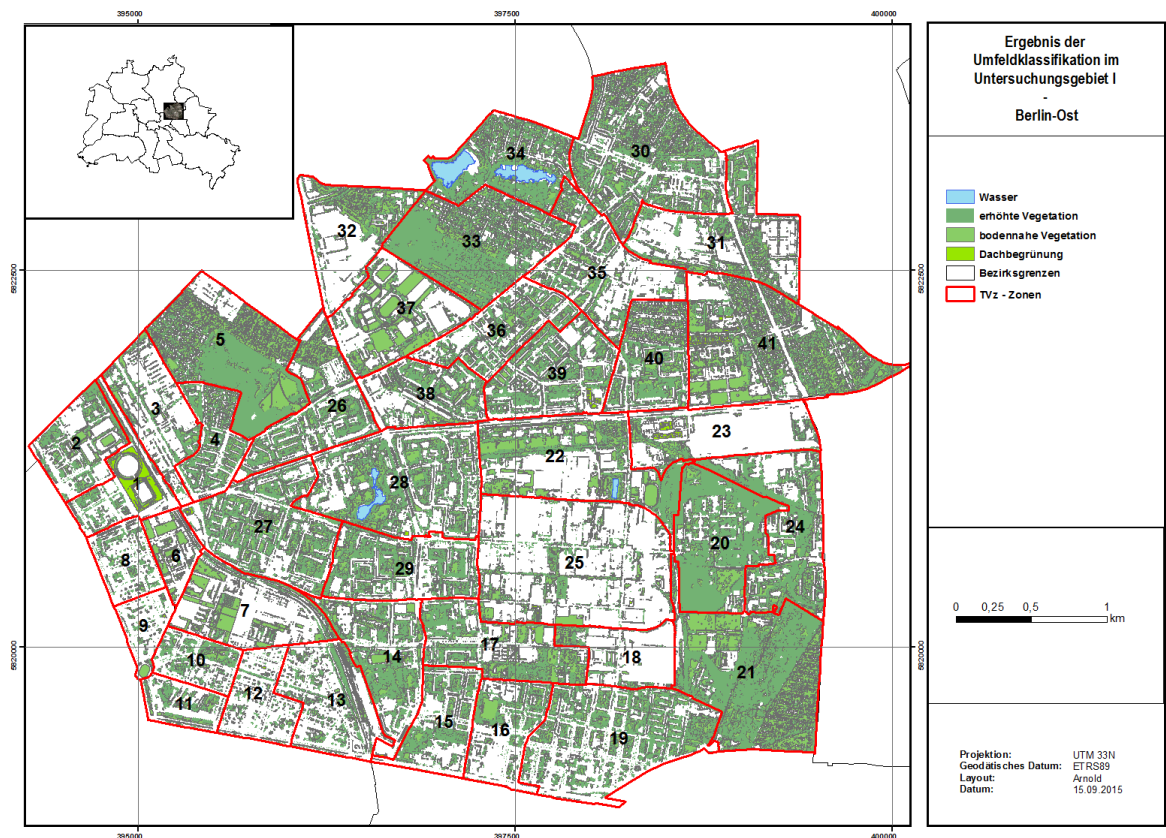


Abb. 7.5 Ergebnis der Umfeldklassifikation im Untersuchungsgebiet I in den Teilverkehrszellen.

Die Abb. 7.4 und 7.5 offenbaren bereits einige generelle Unterschiede in der Bebauung und im Umfeld der Gebäude im Untersuchungsgebiet I. So existiert eine deutliche Süd/West- zu Nord/Ost-Asymmetrie. Der Süd-Westen mit den TVz 8, 9, 10, 11, 12 und 13 ist durch einen hohen Bebauungsanteil von nahezu ausschließlich Altbauten im Gründerstil mit Spitzdächern charakterisiert. Diese Häuser haben oft mehrere Hinterhöfe, relativ einheitliche Bauhöhen, einen hohen Grad an Umschlossenheit und weisen wenig Grün im Umfeld auf. Der Zentralteil des Gebietes ist von neueren Gebäuden geprägt, die sowohl Hochhäuser als auch Flachdachgebäude (3 bis 7 Etagen) und Gebäude unter drei Etagen einschließen. Solche TVz wie 26, 27, 28, 29, 38, 39, und 40 (südlicher Teil) haben nur geringe Anteile älterer Gebäude. Die Bebauungsanteile sind geringer, die Höhenvarianz der Raumboberkante und die Varianz der Umschlossenheit sind größer. Gleichzeitig steigt der Anteil des Grüns zwischen den Gebäuden. Am nordöstlichen Ende des Untersuchungsgebietes findet sich ein Areal, das in seiner Bebauung fast vorstädtischen Charakter hat. Dort dominieren neben Gebäuden unter drei Etagen Einfamilienwohnhäuser. Diesen Charakter haben z.B. die TVz 30 (nördlicher Teil), 33, 34 und 41 (östlicher Teil). Diese TVz weisen einen hohen Anteil an Grün und die TVz 34 ebenfalls an Wasserkörpern auf. Im Zentrum des Untersuchungsgebietes I gibt es auch TVz, die einen sehr hohen Anteil an Gebäuden mit einer speziellen Nutzung haben. Diese Gebäude sind zumeist gewerblich/industriell genutzt. Zu ihnen zählen die TVz 7, (Zentralteil), 18 (östlicher Teil), 22 (südlicher Teil), 23, 24 (nur nördlicher Teil), 25 und 37 (östlicher Teil). Bestechend für diese Gebiete ist gleichzeitig der geringe Anteil an Grün, der deutlich in Abb. 7.5 zu erkennen ist.

7.2 Gebäude und Gebäudestrukturen

Das erste wichtige Kriterium für die Bewertung attraktiven Wohnens ist der Bebauungsanteil im Wohnumfeld. Wie in Kapitel 2 beschrieben, gilt allgemein für städtisches Wohnen ein moderater Wert. Der Abschnitt 2.1 des Kapitels 2 erläutert den Zusammenhang, der eine attraktive Wahrnehmung mit einem mittleren Erregungswert verbindet, der moderaten Variationen entspricht (Abb. 2.1). Zu hohe Bebauungsdichte schafft ein Gefühl der Enge, lässt zu wenig Platz für Grünanteile und wird generell als weniger attraktiv empfunden. Auf der anderen Seite assoziiert eine sehr niedrige Bebauung bereits ländlichen Charakter, der ebenso nicht als optimal für das Gefühl städtischen Wohnens angesehen wird, zumal er zumeist mit langen Wegen zu Versorgungseinrichtungen, zu Freizeitbeschäftigungen und zur Arbeit verbunden ist. Die Abb. 7.6 zeigt eine Choroplethenkarte, die die Bebauung des Untersuchungsgebietes visualisiert. Für diese und alle weiteren Abbildungen, sind die Datentabellen, dem Anhang 7.A zu entnehmen.

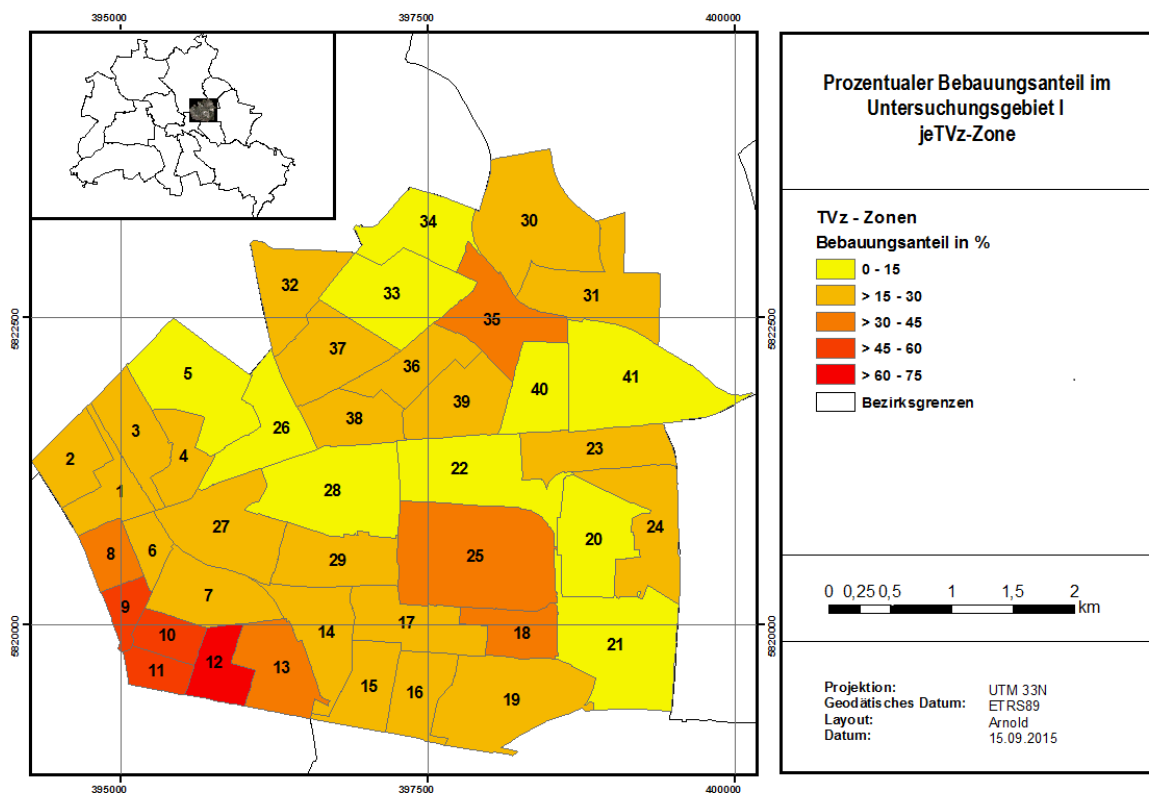


Abb. 7.6 Prozentualer Bebauungsanteil in Untersuchungsgebiet I je TVz (Choroplethenkarte).

Deutlich zu erkennen ist die hohe Dichte der Bebauung in den TVz der Altbauggebiete 9 bis 12, denen die TVz 35 in ihrer Dichte folgt. Die TVz 35 ist ebenfalls von einer hohen Bebauung geprägt. Im Unterschied zu den Zellen 9 bis 12 weist diese Bebauung aber Gebäude unterschiedlichen Baualters aus. Neben den typischen Spitzdachgebäuden der Gründerzeit findet man in dieser Zelle auch andere Gebäude, die Mitte des vergangenen Jahrhunderts entstanden (moderne und nachmoderne Architektur). Die relativ hohe Bebauung der Zellen 25 und 18 hingegen rührt vom hohen Anteil an Spezialbauten her, die meist große Flächen einnehmen, die eine hohe Kompaktheit aufweisen (siehe Abb. 7.4, violett). Niedrige Werte der Bebauung findet man für die nördlichen Gebiete der Zellen 33 und 34, die einen hohen Anteil an Einfamilienwohnhäusern haben. Ein relativ hoher Anteil an Vegetation und eine mäßige Bebauung kennzeichnen ebenso die Gebiete der Zellen 5, 20, 21, 22, 26, 28 sowie 40 und 41.

Eine genauere Analyse der Verteilung der Gebäude nach den Klassen in den Teilverkehrszellen ermöglicht eine Bewertung der Variation über das gesamte Untersuchungsgebiet I. Hierfür wurde der Anteil der einzelnen Gebäudeklasse je TVz ermittelt und die Unterschiede in der Verteilung visualisiert. In der Abb. 7.7 (oberer Teil) sind zunächst die anteiligen Verteilungen der Hochhäuser in den TVz gezeigt. Die vier Gebäudeklassen sind zunächst getrennt als Balkendiagramme für jede TVz gezeigt. Die farbliche Zuordnung entspricht der für die Karten definierten Farbe (siehe Tabelle 5.1, Kapitel 5 sowie Abb. 7.4). Die dieser und allen anderen Abbildungen zu Grunde liegenden Datensätze sind im Anhang 7.A einsehbar. Zur besseren Visualisierung der Verteilungen über das Untersuchungsareal zeigt die Abb. 7.7 (unten) ebenso eine Choroplethenkarte. Dieses Flächenkartogramm stellt die Verteilungsdichte der Summe aller klassifizierten Hochhäuser (Klassen A-D) in einer Farbskalenvarianz dar.

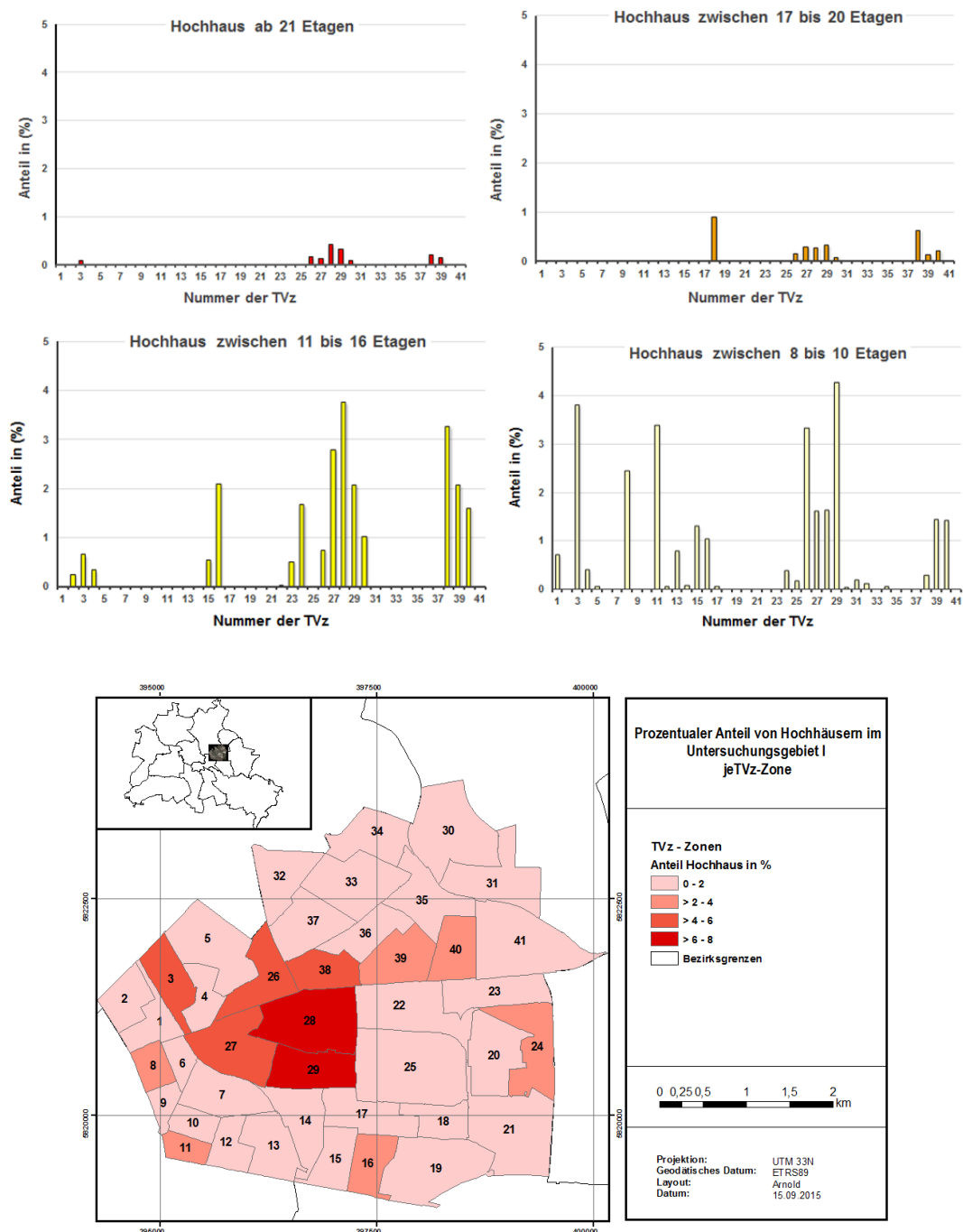


Abb. 7.7 Prozentualer Anteil der Gebäudeklassen der Hochhäuser im Untersuchungsgebiet I.

Oben: Balkendiagramme der Anteile der einzelnen Hochhausklassen je TVz. Unten: Choroplethenkarte – Prozentualer Anteil von Hochhäusern (Summe der Hochhäuser aller Klassen) je TVz.

Die Balkendiagrammdarstellungen der Abb. 7.7 verdeutlichen, dass die zentralen Bereiche (TVz 28 und 29) des Untersuchungsgebietes I den höchsten Anteil an Hochhäusern aufweisen. Beide Zellen beinhalten auch den größten Anteil der höchsten Gebäude des Areals. Bei diesen Hochhäusern handelt es sich meist, um die in Kapitel 5 beschriebenen Plattenbauten. Die benachbarten Zellen 26, 27 mit 5 und 38 folgen in ihren Hochhausanteilen und verdeutlichen eine flächige Restrukturierung des Zentralgebietes in den Jahren zwischen 1970 und 1990. Die Zellen 8, 11, 16, 24, 39 und 40 weisen einen Anteil > 2-4 % auf. Für die TVz 8 und 11 ist das darin begründet, dass die vorwiegend von Spitzdachstrukturen des Typs F (Spitzdach 3 bis 5 Etagen) charakterisierten Bereiche, in der Nachkriegsphase mit einer straßenzugewandten Randbebauung von Gebäuden mit 8 bis 10 Etagen (Typ C) ergänzt wurden. Die Zellen 16 und 24 enthalten Gebäudekomplexe mit 11 bis 16 Etagen (Typ D) und die Zellen 39 und 40 die Typen C/D. Alle restlichen TVz weisen keine oder marginale Anteile an Hochhäusern auf.

In der Abb. 7.8 sind in gleicher Weise, die Ergebnisse für die Gebäudeklassen mittlerer Höhe gezeigt. Die obere Darstellung gibt die prozentuale Verteilung der Gebäude vom Typ E („Flachdachgebäude zwischen 3 bis 7 Etagen“) und vom Typ F („Spitzdachgebäude zwischen 3 bis 5 Etagen“) als Balkendiagramm für jede TVz wieder und die untere Darstellung ist eine Choroplethenkarte zur thematischen Visualisierung der Summe beider.

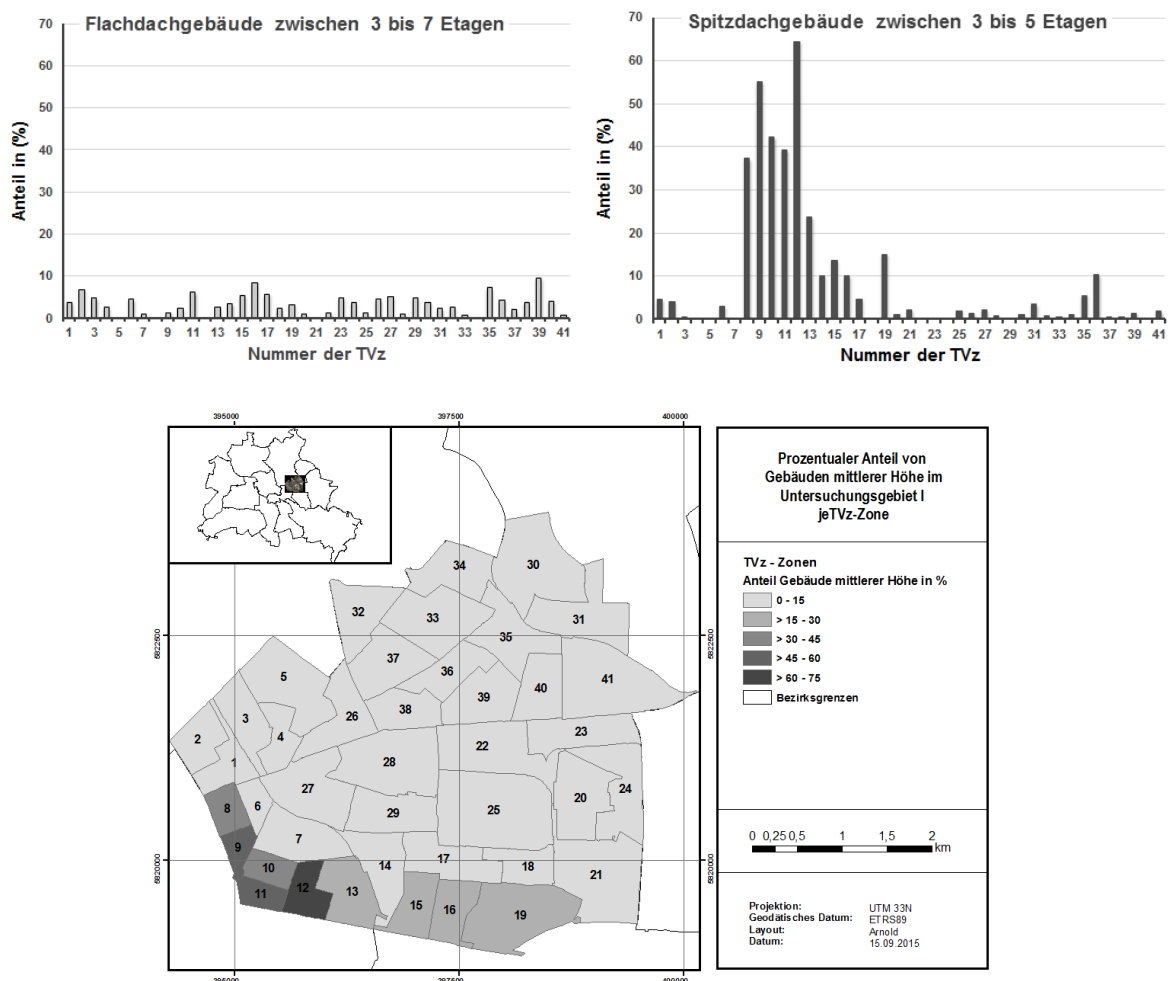


Abb. 7.8 Prozentualer Anteil der Gebäudeklassen der Gebäude mittlerer Höhe im Untersuchungsgebiet I.

Oben: Balkendiagramme der Anteile der einzelnen Gebäudeklassen mittlerer Höhe je TVz. Unten: Choroplethenkarte – Prozentualer Anteil von Gebäuden mittlerer Höhe (Summe der Gebäude Flachdach und Spitzdach) je TVz.

Die Abb. 7.8 (oben) verdeutlicht, dass die Flachdachgebäude mit Etagen zwischen 3 und 7 relativ homogen im Untersuchungsgebiet verteilt sind. Die Spitzdachgebäude mit Etagen zwischen 3 und 5 hingegen zeigen eine stark heterogene Verteilung. Das Maximum dieser Verteilung konzentriert sich auf die TVz mit der höchsten Bebauungsdichte an der südwestlichen Grenze des Untersuchungsgebietes. Das korrespondiert mit dem bereits in 7.1 beschriebenen generellen Trend der Asymmetrie des Areals hinsichtlich seiner Bebauung. Wir sehen hier eine deutliche Dichotomie zwischen dem südlichen bis südwestlichen Teil und dem Rest des Gebietes.

Die folgende Darstellung 7.9 fasst die Resultate der Gebäude niedriger Höhe in der gleichen Art, wie vorab beschrieben zusammen.

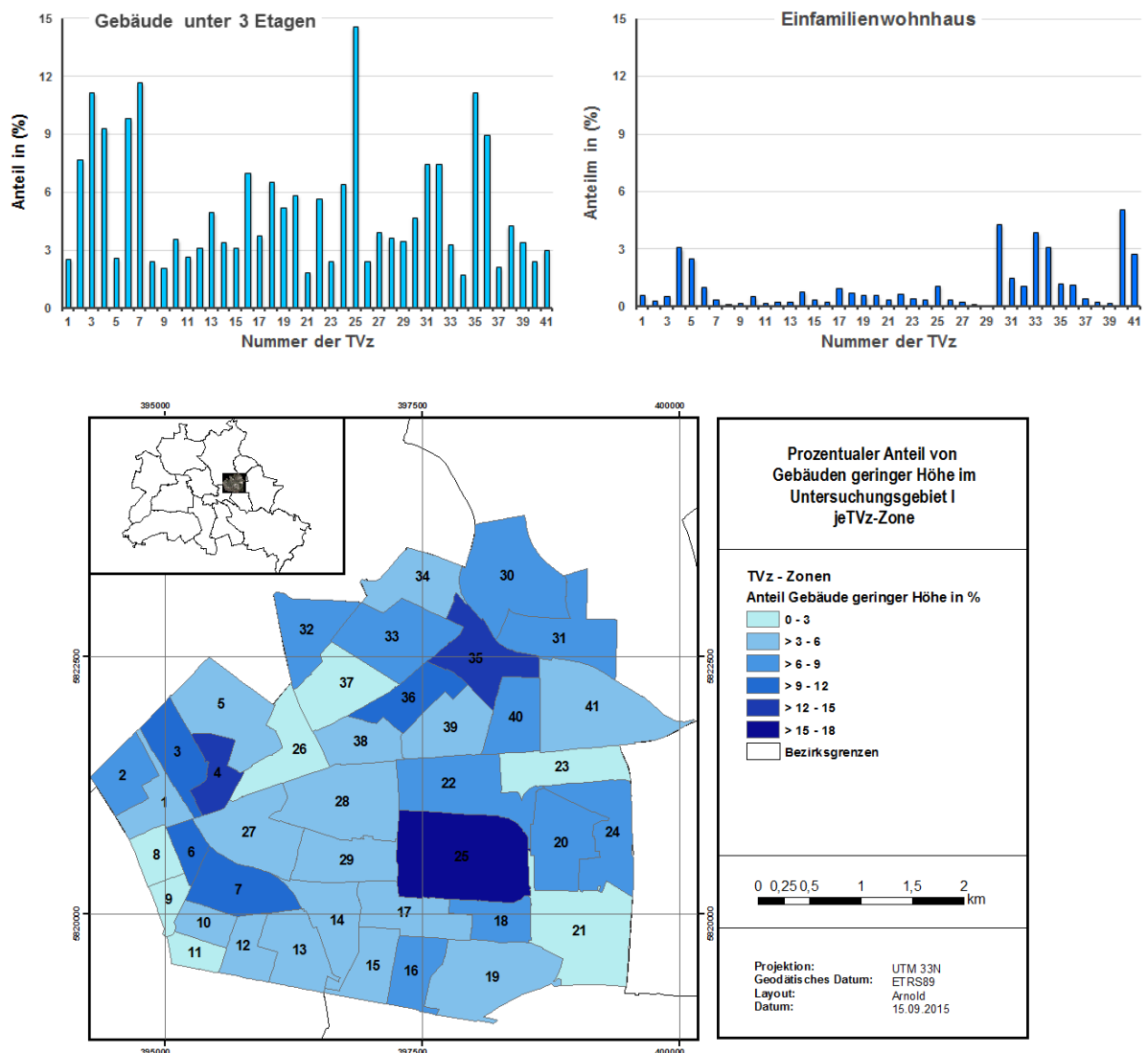


Abb. 7.9 Prozentualer Anteil der Gebäudeklassen der Gebäude niedriger Höhe im Untersuchungsgebiet I.

Oben: Balkendiagramme der Anteile der einzelnen Gebäudeklassen niedriger Höhe je TVz.
Unten: Choroplethenkarte – Prozentualer Anteil von Gebäuden niedriger Höhe (Summe der Gebäude unter 3 Etagen und der Einfamilienwohnhäuser) je TVz.

Die Balkendiagramme der oberen Abbildung zeigen hohe Werte von Einfamilienwohnhäusern in den TVz der nordöstlichen Region des Untersuchungsgebietes. Das ist im Einklang mit den bereits oben diskutierten Ergebnissen. Erwartungsgemäß zeigen die südwestlichen Areale einen relativ geringen Anteil an flachen Gebäuden. Die Verteilung von Gebäuden unter drei Etagen und die von Einfamilienwohnhäusern ist nicht uniform. Während die Klasse G (unter 3 Etagen) eine größere Homogenität der Verteilung aufweist, beschränken sich Cluster der Einfamilienhäuser auf die nordöstlichen Bereiche mit Maxima in den TVz 30, 33, 34 sowie höheren Vorkommen in 31, 32, 35 und 36 sowie in den Zellen 4 und 5. Die Choroplethenkarte illustriert erneut die interessante Dichotomie zwischen dem südwestlichen Areal und den übrigen Gebieten. Maximale Anteile von Gebäuden niedriger Höhe werden in den Zellen 4, 25 und 35 beobachtet. Für die Zellen 25 und 35 korreliert das gut mit dem in Abb. 7.6 gezeigten Bebauungsanteil. Für alle dieser Zellen erschließt sich der relativ hohe Wert logisch aus den Ergebnissen der Gebäudeklassifikation (Abb. 7.4).

In der Darstellung 7.10 sind abschließend die Ergebnisse für die Klasse mit speziellem Nutzen gezeigt.

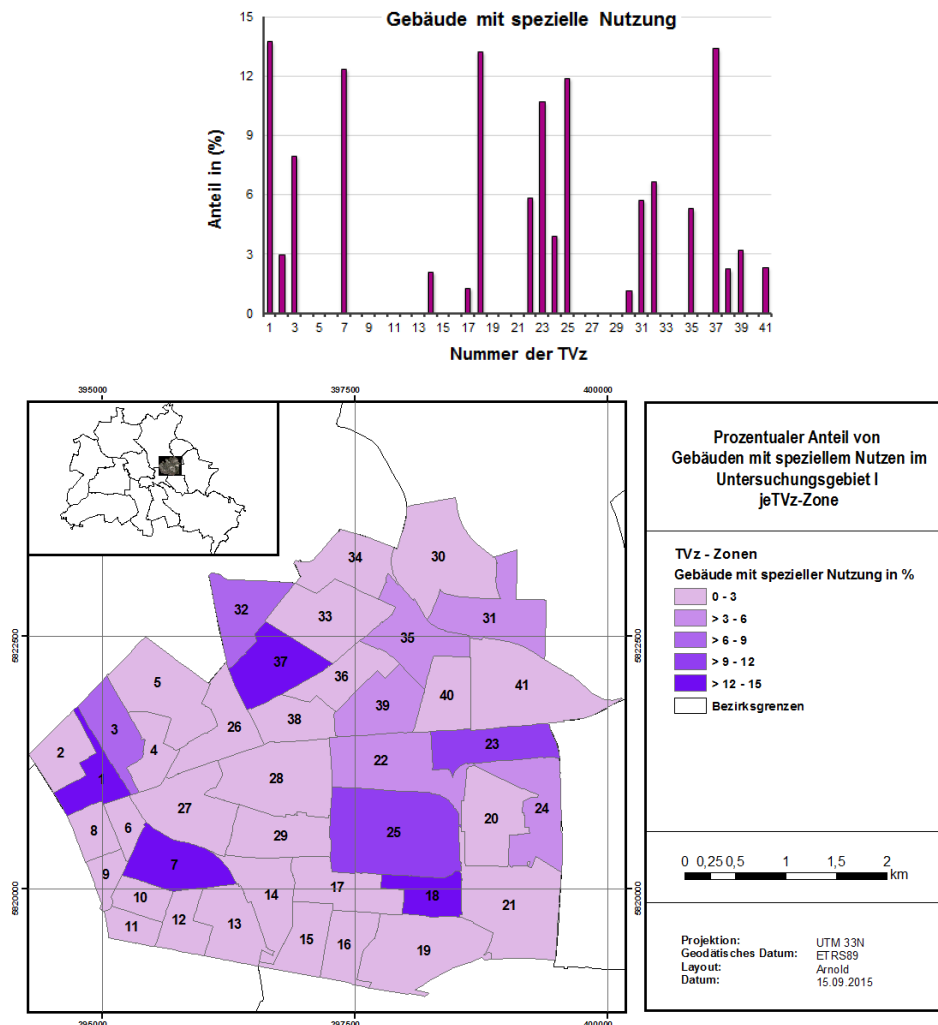


Abb. 7.10 Prozentualer Anteil der Gebäudeklassen mit speziellem Nutzen im Untersuchungsgebiet I.

Oben: Balkendiagramm des Anteils der Gebäude mit speziellem Nutzen je TVz.

Unten: Choroplethenkarte – Prozentualer Anteil von Gebäuden mit speziellem Nutzen je TVz.

Diese gewerblich/industriell genutzten Gebäude haben im Hinblick auf die hier festgelegte Höhenklassifizierung niedrige Höhen. Vergleicht man die Choroplethenkarten dieser Abbildung mit der der vorherigen Darstellung, so sieht man interessante wechselseitige Eigenschaften. Die TVz 25 beinhaltet einen hohen Anteil von Gebäuden mit speziellem Nutzen und gleichzeitig einen hohen Anteil an niedrigen Wohnhäusern. Obgleich man ein solches Ensemble als gelungene Kombination von Gewerbe/Industrie und Wohnstandort im Hinblick auf die einheitliche Raumboberkante bewerten könnte, spricht die konkrete städtebauliche Umsetzung in diesem Areal dagegen. Diese subjektive Wahrnehmung und die Kenntnis des Sachverhaltes aus persönlichem Wissen müssen jedoch für die Arbeit unberücksichtigt bleiben, da solche Eingangsdaten als nicht bekannt gelten müssen.

7.3 Gebäude in ihrem Umfeld

Entsprechend der Diskussion im Kapitel zwei, erlaubt der nächste Schritt, Korrelationen zwischen den messbaren Gebäudegrößen und ihrem Umfeld weitere Bezüge zur Bewertung der Attraktivität des Wohnstandortes herzustellen. Von besonderem Interesse sind dabei die unmittelbare Nähe von städtischem Grün (Bäume, Wiesen, Parks u.a.) und Wasser, die für Bewohner als attraktiv empfunden werden. Die Abb. 7.5 hat bereits die heterogene Verteilung von Vegetation und Wasser in den TVz des Untersuchungsgebietes gezeigt. Die Abb. 7.11 verdeutlicht das durch eine Präsentation des Anteils der Vegetation in den TVz als Balkendiagramm der erhöhten (meist Bäume) und bodennahen Vegetation und als Choroplethenkarte. Die Anteile der extrahierten Dachbegrünung sind in diesen Karten nicht gezeigt, werden aber in Abb. 7.5 ausgewiesen.

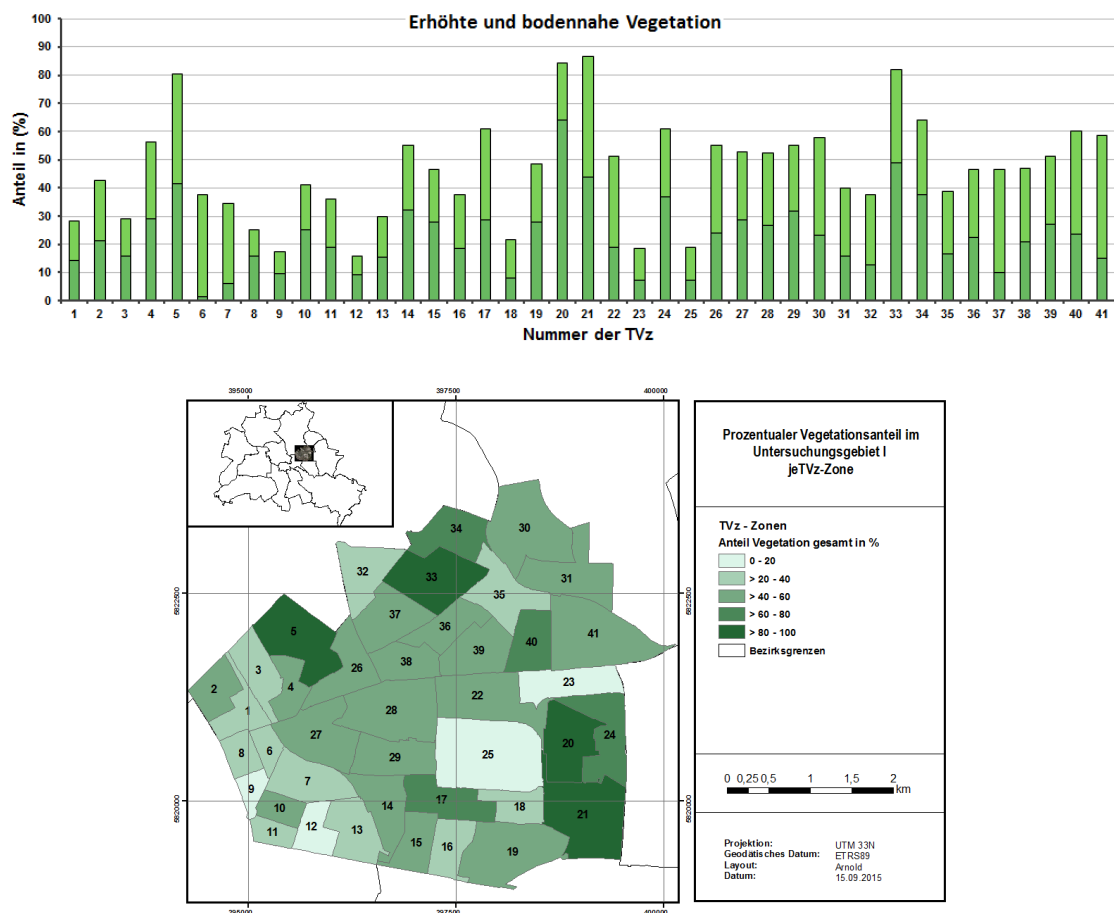


Abb. 7.11 Prozentualer Anteil der Vegetation im Untersuchungsgebiet I (ohne spezielle Berücksichtigung von Sachbegrünung, obere Grünfärbung: bodennahe Vegetation, unten: erhöhte Vegetation).

Oben: Balkendiagramm der Verteilung erhöhter und bodennaher Vegetation je TVz.

Mitte: Choroplethenkarte – Prozentualer Anteil von Vegetation je TVz.

Die Darstellung 7.11 (oben) illustriert die Vegetationsverteilung (ohne Dachbegrünung) über die verschiedenen TVz. Erneut werden die Zusammenhänge zwischen einer hohen Bebauung und wenig Vegetation (Südwesten, z.B. Zellen 9 und 12) sowie geringer Bebauung und einem hohem Anteil an Vegetation (Nord, z.B. Zellen 33 und 34 oder Südost in den Zellen 20 und 21) deutlich. Ebenso zeigt die geringe Vegetationsfläche in Zelle 25 einen Makel in der Attraktivität dieser, der mit der hohen Ansiedlung von Industrie und Gewerbe korrespondiert, jedoch der allgemeinen Ansicht der homogenen Raumboverkante (hier gegeben) als Attraktivitätskriterium widerspricht.

Die beiden vorangegangenen Abschnitte des Kapitels demonstrieren anschaulich, dass relevante Zusammenhänge zwischen messbaren Gebäudemerkmalen und thematischen Informationen ihres Umfeldes aus einer automatisierten und objektbasierten Bildanalyse gewonnen werden können, ohne zusätzliche Vektordaten einsetzen zu müssen. Es erschließen sich nicht nur generelle Interkorrelationen sondern auch allgemeine Schemata für die Bewertung der Wohnattraktivität. So ist es durchaus möglich, dass die Kenntnis dieser Daten neben direkten Informationen über das Wohnumfeld aus klassischen Quellen, die Wohnstandortwahl beeinflussen können. Sie eröffnen gleichzeitig Möglichkeiten zur Stadtentwicklung, indem sowohl Akzente der Besonderheit betont oder heterogene Strukturen durch gezielte Maßnahmen geglättet werden können.

7.4 Relevante Korrelationen für die Attraktivitätsanalyse

Es wäre einfach, die beschriebenen Relationen schon als Ergebnis der Attraktivitätsanalyse stehen zu lassen. Der folgende Abschnitt setzt sich mit Korrelationen der ermittelten Größen auseinander und spiegelt sie mit dem Stand des in Kapitel 2 beschriebenen Standes der Wissenschaft. In Kapitel 2 werden die wenigen, in der Literatur verfügbaren Arbeiten diskutiert, die Attraktivitätsmerkmale versuchen, für allgemeine Anwendungen zu generalisieren. Dabei hat sich die Meinung durchgesetzt, dass mittlere Variationen von Merkmalen positiv auf den Durchschnitt von befragten Betrachtern wirken. Diese „Neutralisierung“ von Erregungswirkungen kann natürlich weiterhin als umstritten gelten, solange keine neuen Verhaltens-theoretischen Gesichtspunkte bekannt werden. Setzt man diesen Ansatz jedoch als richtig voraus, lassen sich weitere interessante Korrelationen herstellen. Die folgenden Abbildungen sollen helfen, das zu veranschaulichen.

Geometrische Korrelationen

Kapitel zwei zeigt, dass die Lehrmeinung davon ausgeht, dass mittlere Variationen von wahrgenommenen Eigenschaften positiv auf den Betrachter wirken und somit direkt relevant für eine attraktive Beurteilung der Szene sind. Wenn diese These richtig ist, können solche Relationen untersucht werden. Die Abb. 7.12, 7.13 und 7.14 stellen solche Abhängigkeiten im Untersuchungsgebiete I dar. Der transparent-grüne Teil in den folgenden Abbildungen entspricht dem nach Kapitel 2 diskutierten allgemeinen „mittleren“ Niveau, das mit Attraktivität verbunden wird.

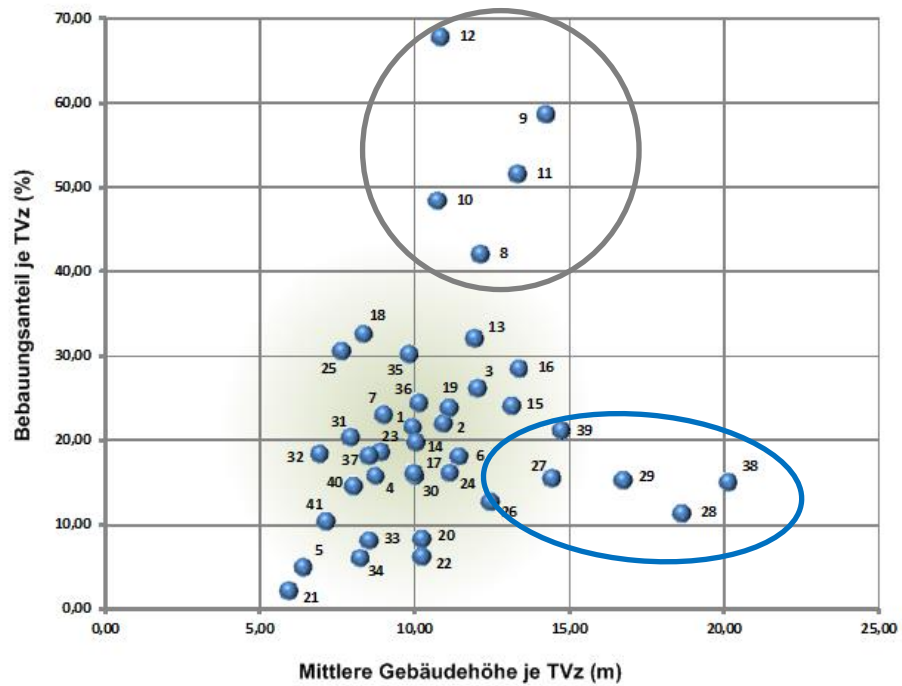


Abb. 7.12 Abhängigkeit des Bebauungsanteils von der mittlern Gebäudehöhe in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.

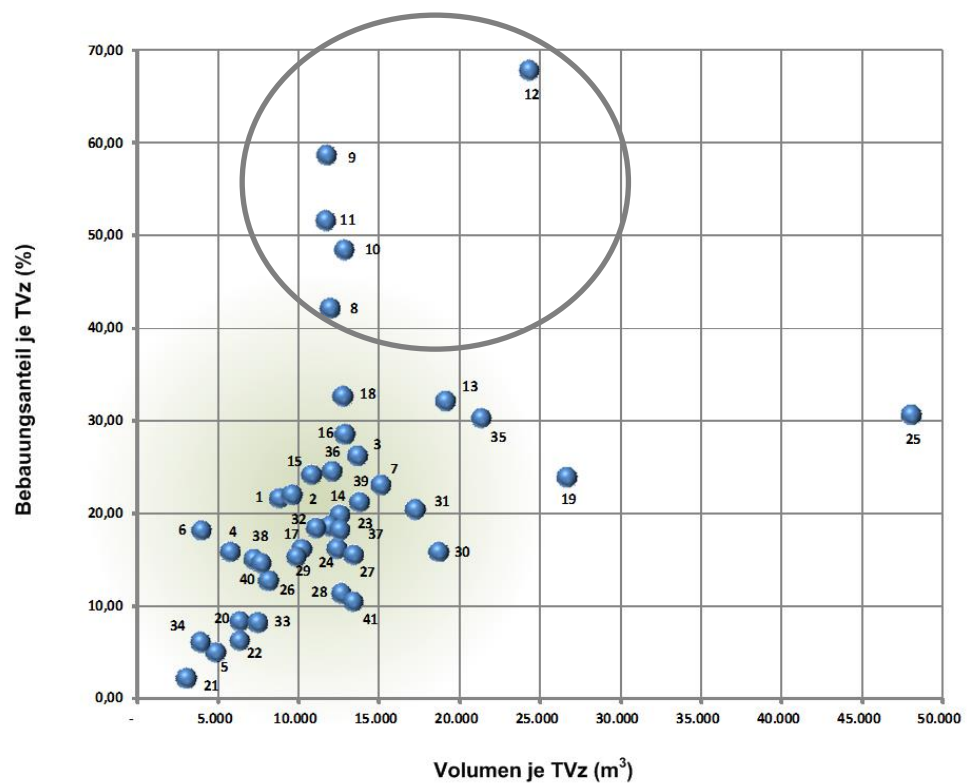


Abb. 7.13 Abhängigkeit des Bebauungsanteils vom mittlern Bebauungsvolumen in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.

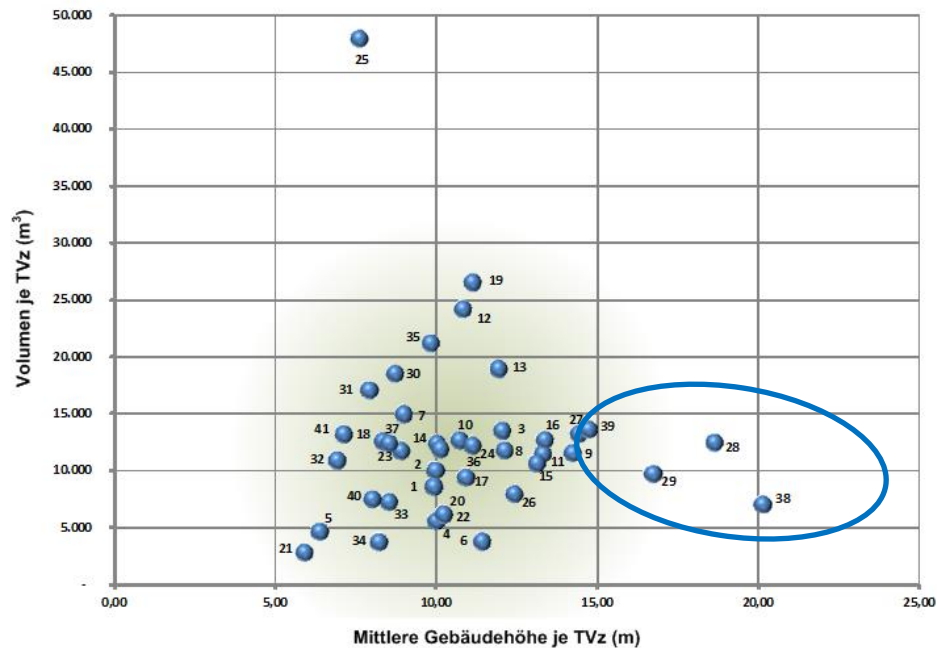


Abb. 7.14 Abhängigkeit des Bebauungsvolumens von der mittlern Gebäudehöhe in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.

Alle drei Darstellungen korrelieren unterschiedliche, geometrische Gebäudekörpereigenschaften untereinander. Der jeweilige Mittelwert ist aus den Mittelwerten der x- und y- Achsen ermittelt worden und steht deshalb für ein einfaches Mittel aller Werte. Die jeweiligen transparent-grünen Punktwolken haben keine quantitative Anbindung. Sie beziehen sich nur qualitativ auf die Ergebnisse des Kapitels 2, dessen Resultate mediale Werte als attraktiv kennzeichnen. Die dargestellte transparent-grün eingefärbte „Wolke“ ist deshalb kein absolutes Maß, sondern nur eine Orientierung in Bezug auf die in Kapitel 2 diskutierten Attraktivitätsmerkmale. In dieser Betrachtung ergeben sich sichtbare Unterschiede, die die Attraktivitätsanalyse nur auf der Grundlage von Luftbilddaten sowohl untermauern als auch relativieren. Abb. 7.12 korreliert den Bebauungsanteil je TVz mit der mittleren Gebäudehöhe. Das Gros der Werte gruppiert sich um den Mittelwert. Die südlichen Areale der TVz 8, 9, 10, 11 und 12 (dunkler Kreis) fallen aus diesem Trend heraus. Sie sind durch einen hohen Bebauungsanteil bei relativ homogener mittlerer Höhe gekennzeichnet. Hohe Bebauungsanteile müssen nach Kapitel 2 als wenig attraktiv gewertet werden, wohingegen eine gleichmäßige Raumberkante positiv zu werten ist. Gleichzeitig verdeutlicht die Abbildung, dass die Werte für die TVz 26, 27, 28, 29, 38 und 39 (blauer Kreis) ein weiteres Cluster bilden. Es sind die TVz, die den größten Anteil von Hochhäusern aufweisen. Diese Areale bestechen durch die stärksten Variationen der Raumberkante, was erneut nach den Ergebnissen der Diskussion im Kapitel 2 als Abstrich an der Attraktivität gewertet werden kann. Die nächste Abb. 7.13 zeigt eine allgemeine Korrelation zwischen Bebauungsanteil und Gebäudevolumen. Generell wächst mit der Bebauungsdichte das Volumen des Gebäudekörpers. Erneut kennzeichnet die transparent-grüne Schattierung die Gruppierung der Ergebnisse um einen Mittelwert. Deutlich weichen wiederum die Werte der TVz 8, 9, 10, 11 und 12 wegen des hohen Bebauungsanteiles hiervon ab. Ebenso fällt der hohe Volumenwert der TVz 25 auf, der mit der hohen Fläche von Gebäuden mit spezieller Nutzung korreliert ist, die eine hohe Kompaktheit haben. Beide sind nach Kapitel 2 als weniger attraktiv zu werten. Der graue Kreis zeigt Areale hoher Bebauungsdichte, und Umschlossenheit an, welche anhand visueller Inspektion identifiziert wurde. Schließlich visualisiert die Abb. 7.14 den Zusammenhang zwischen dem Gebäudevolumen

und der mittleren Gebäudehöhe je TVz. Mittlere Werte sind wieder transparent-grün umschlossen. Auch hier treten die TVz mit den höchsten Anteilen an Hochhäusern als vom Mittelwert abweichendes Cluster (blaue Ellipse) hervor. Ebenso ist dies bei der TVz 25 zu beobachten.

Die Darstellungen zeigen, dass in Verbindung mit den allgemeinen Ergebnissen, die in Kapitel 2 diskutiert sind, Korrelationen geometrischer Gebäudeeigenschaften erste Hinweise auf Attraktivitätsmerkmale liefern, ohne weitere Informationen (Vektordaten, Statistiken, Befragungsergebnisse u.a.) hinzuzuziehen. Für künftige Analysen geometrischer Gebäudeeigenschaften und für die Bewertung der Attraktivität können weitere Größen herangezogen werden. Hierzu gehören die quantitativen Variablen der Umschlossenheit, der Asymmetrie, der Kompaktheit, der Dichte und der Entropie.

Umweltbezogene Korrelationen

Neben den Gebäude-geometrischen Konstellationen beeinflussen Umweltbezüge die Umfeldwahrnehmung. Die folgenden beiden Darstellungen 7.15 und 7.16 zeigen das.

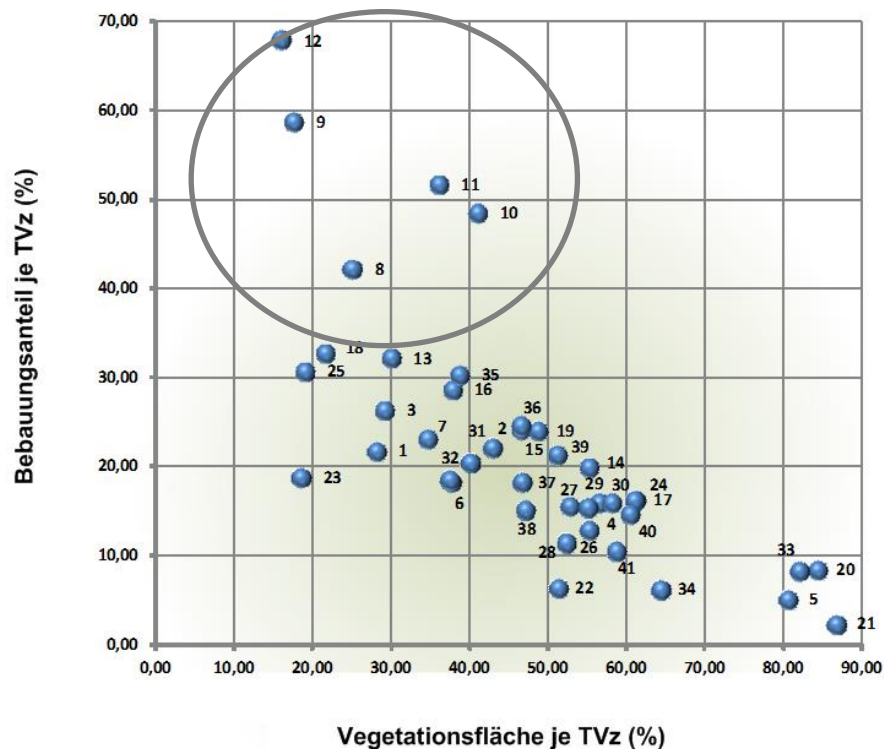


Abb. 7.15 Korrelation zwischen dem Bebauungsanteil und Vegetationsfläche (erhöht + bodennah) in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.

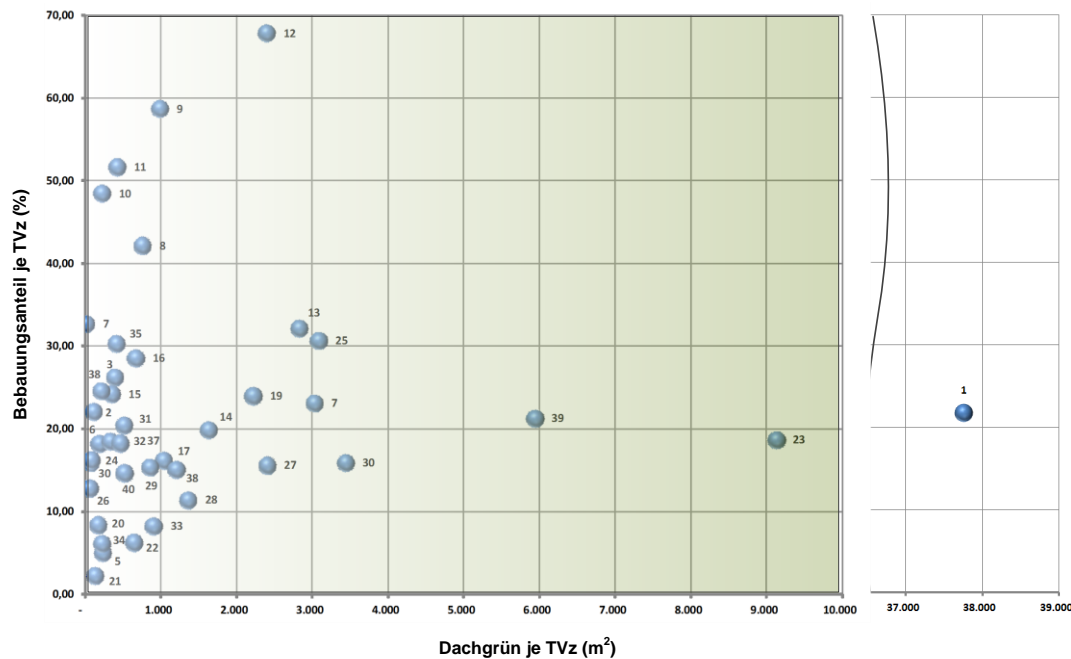


Abb. 7.16 Korrelation zwischen dem Bebauungsanteil und der Dachbegrünung in den einzelnen TVz des Untersuchungsgebietes I.

In der Abb. 7.15 sind die Korrelationen zwischen dem Bebauungsanteilen und der Vegetationsfläche (erhöht+bodennah) gezeigt. Insgesamt nimmt der Anteil an Vegetation mit Abnahme des Bebauungsanteiles zu. Es gilt generell, dass viel Stadtgrün ein positives Attraktivitätsmerkmal ist. Der transparent-grüne Kreis in der Abbildung hat dennoch seine Berechtigung. Er impliziert, dass mit zu hoher Bebauung die Möglichkeit der Platzierung von Stadtgrün eingeschränkt ist. So treten erneut die südlichen Areale mit einer hohen Dichte an Spitzdachgebäuden hervor (grauer Kreis) und das wenige Grün hier muss als negativ für die Bewertung der Attraktivität angesehen werden. Auf der anderen Seite markieren die TVz 5, 20, 21, 33 und 34 zwar Bereiche mit hohem Vegetationsanteil, was zunächst als positiv gewertet werden müsste. Aber gleichzeitig sind diese Bereiche wenig besiedelt und nicht charakteristisch für das städtische Wohnen. Schließlich visualisiert die Abb. 7.16 die Korrelation zwischen dem Bebauungsanteil und der Fläche an Dachgrün. Hier gilt ganz allgemein, je mehr Dachbegrünung desto besser, was durch den ansteigenden transparent-grünen Verlauf in Richtung der x-Achse gezeigt ist. Besonders auffällig ist der hohe Anteil in der TVz 1. Er ist den dortigen Gebäuden mit speziellem Nutzen (Sportanlagen bzw. Veranstaltungsflächen) zuzuschreiben, deren Dächer großflächig begrünt sind. Nicht gesondert diskutiert ist hier die Nähe zu Wasserkörpern (Seen, Flüsse). Im Untersuchungsgebiet I weisen nur drei TVz solche Gewässer auf. Das sind die Zellen 22, 28 und 34. Im Allgemeinen ist die Nähe zum Wasser ein positives Attraktivitätsmerkmal.

Auch diese Betrachtungen zeigen, dass die OBIA zur Extraktion von Paramenten führt, die eine Diskussion von Attraktivitätsmerkmalen ohne die Einbindung zusätzlicher Informationen erlaubt.

Diskussion von Einzelfällen

An dieser Stelle muss auf die Komplexität solcher, wie die hier dargestellten Analysen, verwiesen werden. Die Attraktivität liegt abschließen immer auch im Auge des Betrachters. Sie hängt ebenso von den Bedürfnissen der Stadtbewohner ab, die sich je nach Altersstruktur, familiärer Situation u.a. anders darstellen können. Das Kapitel schließt deshalb mit einigen Überlegungen hierzu, für die einzelne Beispiele hinzugezogen werden.

Teilverkehrszelle 9

Abb. 7.17 zeigt die Distribution der Anteile von Gebäudeklassen innerhalb der TVz 9 und gibt einen Eindruck vom dortigen Stadtbild.

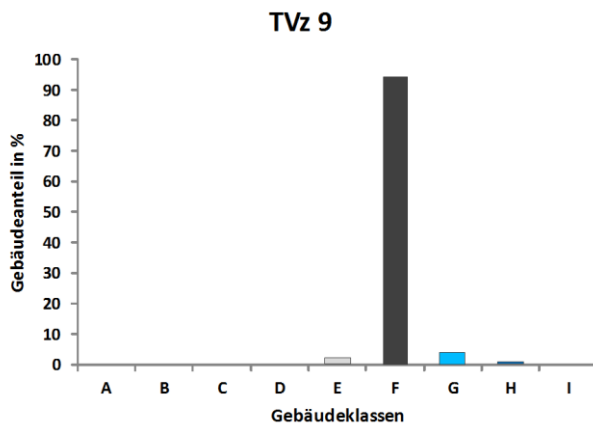


Abb. 7.17 Anteilmäßige Verteilung der Gebäudeklassen in TVz 9 und dortiges Stadtbild.

Die Abb. 7.17 zeigt eine Bebauung, die zu mehr als 90% von Gebäuden mit Spitzdächern geprägt ist (Typ F). Diese Klasse hat eine Höhenvarianz zwischen 13 und 25 Metern. Die ermittelte mittlere Gebäudehöhe für diese TVz beträgt 14,2 m. Damit ist eine hoch homogene Raumoberkante gegeben. Die Homogenität der Bebauung und der Raumoberkante sind positiv für die Attraktivität zu bewerten. Jedoch zeigt die obere Diskussion, dass der Attraktivität in diesem Bereich der hohe Bebauungsanteil und die wenige Vegetation entgegenstehen. Diese negativen Merkmale relativieren die Attraktivität in der Zelle 9. Dennoch ist dieser Bereich ein Anziehungspunkt für viele junge Bewohner, weil sich hier ein reges Stadtleben etabliert hat, das durch Kaffees, Restaurants u.a. gekennzeichnet ist. Das zeigt die Grenzen der eingesetzten Methode auf, die nicht darauf zielen kann, solche Sekundärdaten extrahieren und verwerten zu können.

Ein weiteres Beispiel illustriert die Abb. 7.18 für die Teilverkehrszelle 34

Teilverkehrszelle 34

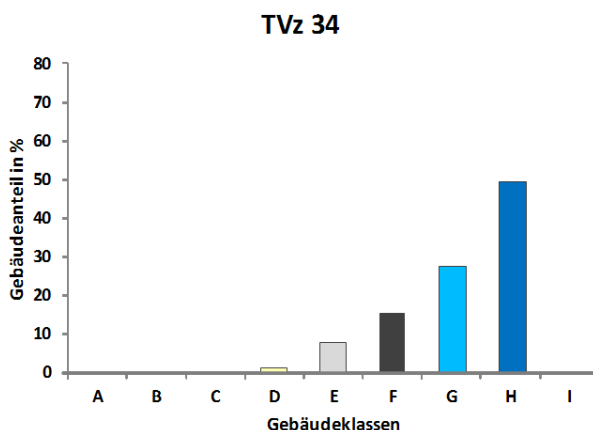


Abb. 7.18 Anteilmäßige Verteilung der Gebäudeklassen in TVz 34 und dortiges Stadtbild.

Die TVz 34 hat einen völlig anderen Charakter als die TVz 9. Dort überwiegen Gebäude wie Einfamilienwohnhäuser (H), Gebäude unter drei Etagen (G) und weniger mittelhohe bis hohe Gebäude. Die TVz hat Wasserkörper und einen hohen Anteil an Vegetation. Das sind alles

Hinweise für ein hohes Maß an Attraktivität. Dort leben viele Familien mit Kindern und ältere Leute. Bei genauerer Betrachtung findet man aber auch Nachteile. Einer ist die mangelnde Infrastruktur, die sich wenig Einkaufsmöglichkeiten und teilweise schlechter Anbindung an den Nahverkehr äußert. Auch eine recht marode Substanz der Fahrwege muss hier hinzugerechnet werden.

Abb. 7.19 zeigt als drittes Beispiel einen Bereich aus dem Zentralfeld des Untersuchungsgebietes I.

Teilverkehrszelle 26

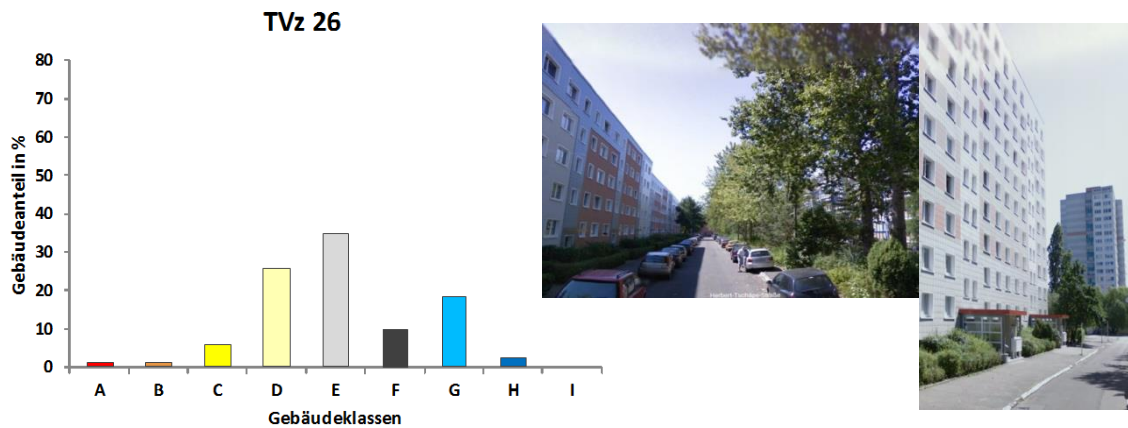


Abb. 7.19 Anteilmäßige Verteilung der Gebäudeklassen in TVz 26 und dortiges Stadtbild.

Die TVz 26 ist durch eine heterogene Bebauung bestimmt. Man trifft hier auf Vertreter aller Gebäudeklassen mit einem lokalen Maximum für die Klasse E („*Flachdach zwischen 3 und 7 Etagen*“). Das Stadtbild wird von Plattenbauten dominiert, die in 1970er bis 1990er Jahren entstanden. Der Bevölkerungsanteil ist breit gestreut. Heterogene Raumboveranten werden nach Kapitel 2 als negatives Attraktivitätsmerkmal gewertet. Demgegenüber schlägt eine mäßige Bebauung und ein mittlerer Anteil an Vegetation positiv zu Buche. Wer sich mit dem Wohnen in Plattenbaugebieten anfreunden kann ist hier gut aufgehoben.

Das letzte Einzelbeispiel visualisiert ein Areal mit hohem Anteil an spezieller Bebauung (Abb. 7.20).

Teilverkehrszelle 25

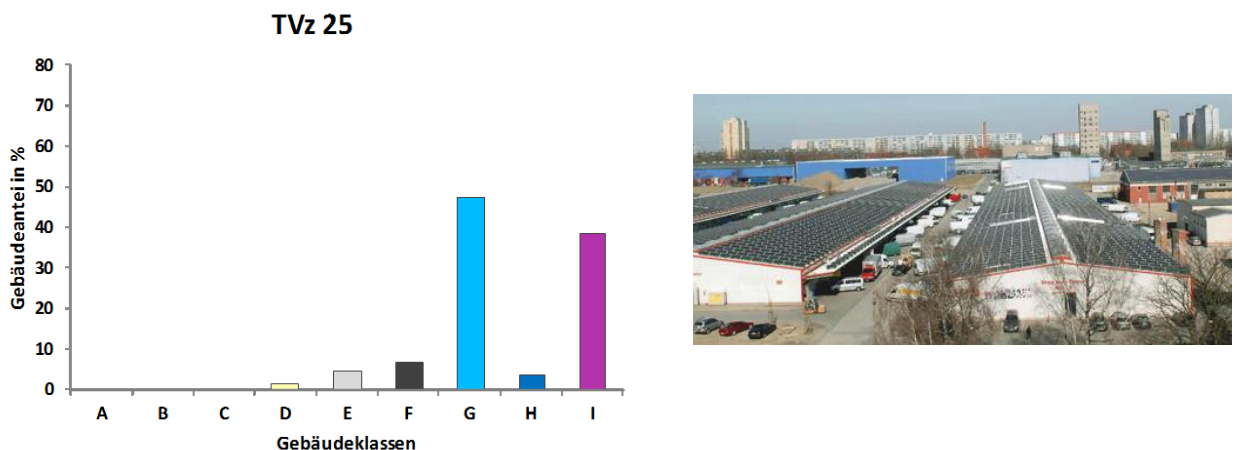


Abb. 7.20 Anteilmäßige Verteilung der Gebäudeklassen in TVz 25 und dortiges Stadtbild.

Die Teilverkehrszelle 25 ist stark von gewerblich und industriell genutzten Gebäuden (I) und Wohngebäuden unter 3 Etagen (G) geprägt. Wenig Vegetation und ein relativ hoher Bebauungsanteil sowie ein großes Volumen (Kompaktheit) kennzeichnen diesen Wohnstandort mit Merkmalen geringer Attraktivität.

Diese Einzelbeispiele verdeutlichen abschließend die verbleibenden Probleme einer Attraktivitätsanalyse, die bewusst nur auf die Luftbilddergebnisse setzen muss und andere Informationen wie Vektordaten, demographische, soziologische, Gebäude-ästhetische u.v.a.m. nicht zu Rate ziehen kann. Dennoch demonstriert das Kapitel 7 die Kapazitäten der Luftbildanalyse, deren entscheidender Mehrwert in der Extraktion valider geometrischer und thematischer Informationen liegt, die schnell und zeitnah erhoben werden können. Diese erlauben bereits eine erste schlüssige Diskussion von Attraktivitätsmerkmalen in urbanen Wohnstandorten.

Anbei ist zu bemerken, dass die Gebäudeflächen für die Attraktivitätsanalyse einen höheren Flächenanteil ausmachen, als es in der Genauigkeitsanalyse in Kapitel 6 bei dem Klassifikationsergebnis ausgewiesen ist. Dies ist damit zu begründen, dass einige Gebäudekomplexe durch zwei TVz verlaufen und somit bei der Abfrage doppelt gezählt werden. Eine Auftrennung (*split*) der Gebäudeklassen mit den TVz-Flächen hätte dieses Problem umgangen, jedoch wären dann aus einem Objekt, zwei Objekte entstanden. Ein Gebäude hätte somit in seiner Mitte geteilt werden können. Da dies nicht erwünscht war, wurde dieser Fehler toleriert. Die Vegetationsflächen hingegen wurden mit den TVz-Flächen verschnitten, da bei diesen eine Zerteilung der Elemente eine untergeordnete Rolle spielt.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass Luftbilddaten eine solide Grundlage für die Gebäudetypisierung in urbanen Wohnstandorten sind. Bei gleichzeitiger flächiger Abdeckung der Untersuchungsgebiete und einer guten räumlichen Auflösung, wie sie das Kamerasystem der UltraCamX gestattet, können automatisierte Verfahren zur objektbasierten Bildanalyse (OBIA) eingesetzt werden, die die Extraktion von charakteristischen, geometrischen Gebäudeeigenschaften in der erforderlichen Qualität gewährleisten. Der Vorteil der Methode und ihr Mehrwert zur Gebäudetypisierung z.B. gegenüber amtlichen Liegenschaftskarten bestehen neben der flächigen Abdeckung von Analysegebieten und in der Möglichkeit mit Befliegungen, auch jeweils aktuelle und zeitgleich gewonnene Daten einsetzen zu können. Ergebnisse verschiedener Befliegungskampagnen erlauben zudem, zeitliche Abfolgen und damit dynamische Prozesse in der urbanen Gestaltung zu dokumentieren. Diese Komponenten sind von Vorteil im Vergleich zu den zeitaufwendigen, langwierigen und teilweise kostenintensiven terrestrischen Vermessungen von Gebäudegrundrissen, deren Daten in amtlichen Liegenschaftskarten integriert werden. Die Perspektive der Fernerkundung erlaubt, einen weiteren Vorteil der Methode zu nutzen. Es ist möglich, die Dachstrukturen, Dachaufbauten, Dachbegrünung oder das Vorhandensein von Balkonen zu untersuchen. Damit werden auch Eigenschaften bestimmt, die in Liegenschaftskarten nicht erfasst werden. Darüber hinaus kann mit Luftbilddaten ebenfalls das unmittelbare Umfeld der Gebäude, die Vegetation, die Wassernähe oder andere Umfeldparameter extrahiert und diese in die Analyse eingebunden werden. Weiterhin ist hervorzuheben, dass die OBIA aus Fernerkundungsdaten in Regionen, für nicht die wie in Deutschland ein Liegenschaftskataster geführt wird, ein Liegenschaftskataster einen enormen Vorteil bietet, eine erste Erfassung des Objektbestandes von Vegetation, Wasserkörpern und Gebäudestrukturen zu ermöglichen. Eine Vermessung mit herkömmlichen terrestrischen Methoden steht trotz der höheren Genauigkeit der ermittelten Grundrissinformationen von Gebäuden in keinem Verhältnis zu der Extraktionsgeschwindigkeit von Informationen aus Fernerkundungsdaten. Somit sind Analysen an jedem Ort der Welt möglich, solange geeignete Fernerkundungsdaten zur Verfügung stehen. Der eigentliche Vorteil eines True Ortho Mosaik, nämlich die unverzerrte Draufsicht auf alle Objekte in dem Bild macht aber auch eine große Schwäche deutlich. Objekte die aufgrund ihrer Höhe von anderen Objekten verdeckt werden, sind nicht identifizierbar. Dies wird hauptsächlich an Gebäudeobjekten deutlich, deren Dachfläche von einem Baum überlagert wird. Dadurch gehen wertvolle Informationen über die Existenz und Beschaffenheit von Objekten verloren, die durch eine Analyse vor Ort identifizierbar sind.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine automatisierte OBIA für die Extraktion der Gebäudeparameter entwickelt und eingesetzt. Neben den Luftbilddaten kamen keine weiteren Referenzdaten zum Einsatz. Lediglich für die Genauigkeitsanalyse wurden Liegenschaftsdaten (ALK-Berlin) der Gebäude verwendet, um die Eignung der Luftbilddaten für die Attraktivitätsanalyse von Wohnstandorten und deren Qualität zu testen. Ein wichtiger Aspekt für die Umsetzung war die Verfügbarkeit eines True Ortho Mosaiks, eines normalisierten digitalen Oberflächenmodells (nDOM) und einer Count Maske. Der Vorteil des True Ortho Mosaiks ist die unverzerrte zentralperspektivische Ansicht, die obendrein Messungen von geometrischen Parametern erlaubt. Das nDOM gestattet die Extraktion von Höheninformationen und ist daher für eine Typisierung von Gebäudestrukturen in einem stark heterogen bebauten urbanen System unerlässlich. Ohne dieses könnten lediglich flächige Objektparameter extrahiert werden. In einer parallelen Analyse wurde die Geschossanzahl aus der ALK mit den Höhenvariationen der

Gebäudeobjekte sinnvoll korreliert. Im Ergebnis der OBIA konnten somit neun Gebäudeklassen ermittelt werden. Die OBIA-Resultate wurden anschließend mit geeigneten attribuierten Objekteigenschaften in ein Geoinformationssystem zur weiteren Bereinigung von Fehlklassifizierungen überführt und abschließend in eine Geodatenbank für weitere Analysen übertragen. Ein Workflow dokumentiert die verschiedenen Prozessschritte anschaulich. Die Kapazität des Verfahrens wurde an zwei Berliner Untersuchungsgebieten getestet. Die Ergebnisse wurden in jedem Schritt kritisch auf ihre Qualität überprüft. Sowohl eine umfassende Genauigkeitsanalyse der Extraktionsergebnisse als auch ein Vergleich der extrahierten Gebäudeklassen mit den Geschosshöhen der Liegenschaftsdaten wurde vorgenommen. Die Genauigkeitsanalyse hat gezeigt, dass von Problemen bei der exakten Festlegung von Geschosshöhen und bekannten Effekten wie Dachüberständen, Schattenwürfen, Objektverdeckungen, Höhenfehler im Oberflächenmodell u.a. wie in der Arbeit beschrieben, sehr gute bis gute Ergebnisse der Klassenzuordnungen erzielt werden konnten.

Für die sich anschließende Attraktivitätsanalyse wurde eine Feinstrukturuntersuchung des in seine Teilverkehrszellen untergliederten Untersuchungsgebietes I vorgenommen. Es konnten Korrelationen der geometrischen Gebäudeparameter und Korrelationen mit den Charakteristika des nahen Umfeldes, wie Vegetation und Wasser untersucht werden und ihre Relevanz für die Attraktivität des Wohnstandortes diskutiert werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass Zusammenhänge zwischen messbaren Gebäudemerkmalen und thematischen Informationen ihres Umfeldes gewonnen werden können, die in Verbindung mit Attraktivitätsmerkmalen stehen. Zu ihnen gehören Abhängigkeiten des Bebauungsanteiles in Relation zu den Bebauungsvolumina und den mittleren Gebäudehöhen, deren Korrelationen zu den im zweiten Kapitel generalisierten Merkmalen der urbanen Gebäudeattraktivität begründet wurden. Ebenso erlauben Zusammenhänge dieser Größen mit der Fläche urbanen Grüns oder der Nähe zu Wasser eine differenzierte Diskussion der Attraktivität der betrachteten Wohnstandorte. Künftige Analysen, die weitere Größen wie die quantitativen Variablen der Umschlossenheit, der Asymmetrie, der Kompaktheit, der Dichte und der Entropie einbeziehen, können den Raum für solche Untersuchungen noch erweitern und helfen, belastbare, messbare Indizes für eine automatisierte Attraktivitätsanalyse zu generieren.

Das liefert bereits den ersten Ausblick auf mögliche künftige Untersuchungen. Von Seiten der einsetzbaren Methoden der Fernerkundung, muss erwähnt werden, dass neben den geeigneten Luftbilddaufnahmen hoher räumlicher Auflösung auch immer mehr multisensorische Systeme zum Einsatz kommen, die die Vorteile der jeweiligen Einzelmethode durch deren Kombination nutzen. Diese Systeme und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile wie LiDAR und SAR/InSAR sind in der Arbeit beschrieben worden. So kann ein Oberflächenmodell aus LiDAR-Daten in Verbindung mit sehr hochauflösenden Luftbilddaten die Extraktionsgenauigkeit insbesondere in Schattenflächen und Gebäudekanten maßgeblich verbessern. Es muss natürlich bemerkt werden, dass die multisensorische Fernerkundung auch einen erheblichen Aufwand zur Datenfusion und der Bearbeitung großer Datenvolumina nach sich zieht, sodass ihr Einsatz bezogen auf die Fragestellung jeweils abgewogen werden muss. Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung von Gebäudestrukturen ist die sich immer weiter verbessernde Schrägbildfotografie (Oblique Luftbildfotografie). Mit ihr ist es möglich, mittels neuer Kamerasysteme und photogrammetrischer Methoden, dreidimensionale Bilder zu erzeugen und Fassadenelemente und Gebäudemerkmale zu extrahieren, deren Analyse in einer zentralperspektivischen Ansicht nicht möglich ist. Hierzu gehören Balkone, Terrassen, Fassadenelemente und -farben sowie

möglicherweise eine Bewertung des Außenzustandes eines Gebäudes. Zur Verbesserung der Genauigkeit der Gebäudetypisierung kann künftig eine Kombination von Fernerkundungsdaten und terrestrisch vermessenen Grundrissdaten sein. Die Möglichkeiten der Extraktion von detailreichen Objekten bieten ein hohes Maß an zusätzlichen Informationen, die in Liegenschaftsdaten nicht erfasst sind. Weiterhin können zusätzliche Kombinationen von Vektordaten und anderen Informationen wie Branchenbüchern über die Nutzungseigenschaften von Gebäuden oder Verkehrsanbindungen zu Wohnstandorten einen Mehrwert liefern. Dadurch werden erweiterte Analysen zu Attraktivitätsmerkmalen möglich, da die vorhandenen Informationen in amtlichen Liegenschaftskarten um weitere Attribute ergänzt werden können. Insgesamt eröffnen sich dadurch mit dem Einsatz von automatisierten OBIA-Verfahren neue, noch wenig untersuchte und entwickelbare Wege für eine automatisierte Attraktivitätsanalyse in städtischen Wohnstandorten, die der Forschung zu urbanen Entwicklungen und der Mobilität wichtige, jeweils aktuelle Eingangsgrößen liefern können.

Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, J. et al. (2012): Das digitale Luftbild. Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (Band 7). Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (Hrsg.). Göttingen: Universitätsverlag Göttingen.
- AKALINE, A.Y., WILSON, K. & KILICOGLU, C.O. (2009): Architecture and engineering student's evaluations of house facades. *Journal of Environmental Psychology* 29, 124-132.
- ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- ALBERTZ, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung. 3. Erweiterte Auflage. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- ANDRESEN, T. (2004): Strategien zur wissensbasierten Bildanalyse hoch auflösender Fernerkundungsdatensätze für das Monitoring gewässernaher Feuchtgebiete. Dissertation, Department für Ökologie. Fachgebiet für Limnologie.
- ARNOLD, L. (2013): Automatisierte OBIA Erfassung von urbanem Grün aus UltraCam X Fernerkundungsbilddaten und Höheninformationen. Erprobung der Extraktionsmöglichkeiten von Einzelbaumobjekten in urbanen Gebieten aus Luftbilddaten. Berlin: Beuth Hochschule für Technik Berlin.
- ATTESLANDER, P. (1971): Methoden der empirischen Sozialforschung. Berlin.
- BAATZ, M., BINNING, G., ESCHENBACHER, P., MALCHINGER, A. & SÖGTROP, M. (1998): Verfahren zum Segmentieren eines digitalen Bildes. Deutschland, Patent Nr. EP 0 858 051 A2, 12.08.1998, DELPHI Systemsimulation GmbH, München.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (2000): Multiresolution Segmentation - an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, Karlsruhe, Herbert Wichmann Verlag: 12-23.
- BAATZ, M. SCHÄPE, A. & SCHMIDT, G. (2001): Verfahren zur Verarbeitung von Datenstrukturen. Deutschland, Patent Nr. DE 199 60 372 A 1, 21.06.2001 Definiens AG, 80331 München, DE.
- BAATZ, M., BENZ, U., DEGHANI, S., HEYENEN, M., HÖLTJE, A., HOFMANN, P., LINGENFELDER, I., MIMLER, M., SOHLBACH, M., WEBER, M. & WILLHAUK, G. (2002): eCognition user guide 3. Defeniens, München.

- BAHRENBURG, G., GIESE, E., MEYENKLAMP, N. & NIPPER, J. (2010): Statistische Methoden in der Geographie. Band 1: Univariate und bivariate Statistik. 5. Auflage. Stuttgart.
- BERLYNE, D.E. (1971): Aesthetics and psychology. New York: Appleton Century Crofts.
- BERLYNE, D.E. (1974): Studies in the new experimental aesthetics. New York: John Wiley.
- BRAMLEY, G. & POWER, S. (2009): Urban form and social sustainability: the role of density and housing type. *Environmental and Planning B: Planning and Design* 36, 30-48.
- BRENNER, A. & ENDER, J. (2006): Demonstration of advanced reconnaissance techniques with the airborne SAR/GMTI sensor PAMIR. *Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings* 153(2): 152-162.
- BURGER, W. & BURGE, M. (2005): Digitale Bildverarbeitung. Eine Einführung mit Java und ImageJ. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- CATANI, F., FARINA, P., MORETTI, S., NICO, G. & STROZZI, T. (2005): On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements. *Geomorphology* 66(1-4): 119-131.
- CLIFTON, K., EWING, R., KNAAP, G.-J. & SONG, Y. (2008): Quantitative analysis of urban form: a multidisciplinary review, *Journal of Urbanism* 1, 17-45.
- CONGALTON, R. G. & GREEN, K. (1999): Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. Principles and Practices. Boca Raton: Lewis Publishers.
- CONGALTON, R.G. (2001): Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. *International Journal of Wildland Fire* 10(4): 321-328.
- EECKHAUT, M.V., POESEN, J., VERSTRAETEN, G., VANACKER, V., NYSEN, J., MOEYERSONS, J., BEEK, L.P., & VANDEKERCKHOVE, L. (2007): Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surface Processes and Landforms* 32(5): 754-769.
- FECHNER, G.T. (1871): Zur experimentellen Ästhetik. In: *Vorschule der Ästhetik*, Leipzig.
- FLADE, A. (1987): Wohnen psychologisch betrachtet. Bern: Huber.
- GAMBA, P. & HOUDHMAND, B. (2002): Joint analysis of SAR, LiDAR and aerial imagery for simultaneous extraction of land cover, DTM and 3D shape of buildings. *Remote Sensing* 23 (20), 4439-4450.
- GEHL, J., KAEFER, L.J. & REIGSTAD, S. (2006): Close encounters with buildings, *Urban Design* 11, 29-47.

- GROWE, S. (2000): Wissensbasierte Interpretation multitemporaler Luftbilder. Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik. Universität Hannover.
- GRUBER, M., PONTICELLI, M., BERNÖGGER, S. & LEBERL, F. (2008): UltracamX, the Large Format Digital Aerial Camera System by Vexcel Imaging/Microsoft. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37: 665-670.
- HAHN, D. (2009): Architekturpsychologische Aspekte am Beispiel ausgewählter Bürohochhäuser. Diplomarbeit, Universität Wien, Lehrstuhl für Psychologie.
- HANSCHKE, U. & BEDDING, D. (1995/2005): Flächentypen. Eine Beschreibung der im Informationssystem Stadt und Umwelt (ISU) der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung erfassten und verwalteten Struktur- und Flächennutzungskategorien von Berlin. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, III F. Berlin.
- HARALICK, R. M. & SHAPIRO, L.G. (1985): Image Segmentation Techniques. Comput Vision Graph 29 (1): 100-132.
- HELFER, E. (2006): Die äußere Hülle: Der Einfluss architektonischer Gestaltungsmerkmale auf die Ästhetik von Hausfassaden, Diplomarbeit, Universität Wien, Lehrstuhl für Psychologie.
- HIRSCHMÜLLER, H. & BUCHER, T. (2010): Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) 19: 571-580.
- IMAMOGLU, C. (2000): Complexity, linking and familiarity: architecture and non-architecture Turkish student's assessments of traditional and modern house facades. Journal of Environmental Psychology 20, 5-16.
- JABAREEN, Y.R. (2006): Sustainable Urban Forms. Journal of Education and Research 26, 38-52.
- JAHN, H & REULKE, R. (1995): Systemtheoretische Grundlagen optoelektronischer Sensoren. Akademie Verlag, Berlin.
- JÄHNE, B. (2012): Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- KAPLAN, S. & KAPLAN, R. (1982). Cognition and environment: Functioning in an uncertain world. New York: Praeger, Chapter 4.
- KAPLAN, S. (1987). Aesthetics, Affect, and Cognition. Environmental Preference from an Evolutionary Perspective. Environment and Behavior 19(1), 3-32.
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie Band 1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laseraufnahmen. 7. Aufl. New York: Gruyter – de Gruyter Lehrbücher.

- KREYZIG, E. (1968): Statistische Methoden und ihre Anwendungen. Göttingen: Vandenhoeck.
- KUBINGER, K.D., KUBINGER, H., TRAWÖGER, S., STUMM, G. & KLIMEK, ST. (1986): Psychologische Faktoren bei der Partizipation im Wohnbau. Langzeiteffekte und subjektive Wertsysteme. In: BLAHA, W., WEBER, G., GÄRTNER, R., KUBINGER, K., KNOFLACHER, M., KOLLER, M., STIDL, H.-G. & STRAUSS, G. (Eds.), Mindestanforderungen an die Wohnumwelt. Wien, Forschungsgesellschaft für Wohnen, Bauen und Planen, 45-75.
- LANDIS, J.R. & KOCH, G.G. (1977): The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 3: 159-174.
- LANDIS, J. R. & KOCH, G. G. (1977): The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. In: *Biometrics* 3, 159-174.
- LANG, J. (1988): Symbolic aesthetics in architecture - towards a research agenda. In: Nasar, J.L. (Ed.), *Environmental Aesthetics*, Cambridge: Cambridge University Press, 11-26.
- LEBERL, F., GRUBER, M., PONTICELLI, M. & WICHERT, A. (2012): The UltraCam Story. *IAPRS International Archives for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sciences XXXIX*, C1: 1-6.
- LEFSKY, M.A., COHEN, W.B., PARKER, G.G. & HARDING, D.J. (2002): LIDAR remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*: 19-30.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. & CHIPMAN, J.W. (2004): *Remote Sensing and Image Interpretation*. 5th Edition. New York: John Wiley and Sons.
- MADERTHANER, R. (1978): Komplexität und Monotonie aus architekturpsychologischer Sicht. *Der Aufbau* 6, 257-262.
- MADERTHANER, R. (1998): Wohlbefinden, Lebensqualität und Umwelt. In: Kryspin I. Lueger-Schuster B & Weber G. (Ed.), *Klinische Psychologie und Gesundheitspsychologie*, Wien, WUV, Universitätsverlag.
- MARTENS, C. (2000): Entwurf einer agentenorientierten Softwarestruktur für einen Rehabilitationsroboter. Diplomarbeit, Fernuniversität Gesamthochschule Hagen. Fachbereich Elektrotechnik.
- MASLOW, A.A. (1954): *Motivation and personality*. New York, Harper and Row.
- MAYER, S. (2004): Automatisierte Objekterkennung zur Interpretation hochauflösender Bilddaten in der Erdfernerkundung. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II.

- MOSSIG, I. (2012): Stichproben, Stichprobenauswahlverfahren und Berechnung des minimal erforderlichen Stichprobenumfangs. Beiträge zur Wirtschaftsgeographie und Regionalentwicklung. Band 1, Nr. 1: Universität Bremen, Institut für Geographie.
- MOTT, C., ANDRESEN, T., ZIMMERMANN, S., SCHNEIDER, T., AMMER, U. (2002): „Selektives“ region growing – ein objektorientierter Klassifikationsansatz. Angewandte Geographische Informationsverarbeitung (AGIT), Heidelberg. XIV: 363-368.
- NASAR, J.L. (1988): Environmental aesthetics: theory, research and applications. Preiswer, W. & Rohane, K. (Eds.), Cambridge: Cambridge University Press.
- NASAR, J.L. (1994): Urban Design Aesthetics. The Evaluative Quantities of Building Exteriors, Environment and Behaviour 26(3), 377-401.
- NEUBAUER, S. (2006): Ästhetisches Erleben von modernen Fassaden innerhalb historischer Häuserzeilen. Diplomarbeit, Universität Wien, Psychologische Fakultät.
- NIELSEN, M.Ø. (2004): True orthophoto generation. Lyngby. Technical University of Denmark. Informatics and Mathematical Modelling.
- NIETHAMMER, U. (2013): UAV-basierte Fernerkundungsmethoden der Aerogeophysik für die hochauflösende Beobachtung von alpinen Rutschhängen. Dissertation, Institut für Geophysik der Universität Stuttgart.
- OCZIPKA, M. E. (2007): Objektbasierte Klassifizierung hochauflösender Daten in urbanen Räumen unter besonderer Berücksichtigung von Oberflächenmodellen. Dissertation, Freie Universität. Berlin.
- PEPE, A., SANSOSTI, E., BERARDINO, P. & LANARI, R. (2005): On the generation of ERS/ENVISAT DInSAR time-series via the SBAS technique. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2:265-269.
- POLI, D. & CARAVAGGI, I. (2013): 3D modeling of large urban areas with stereo VHR satellite imagery. Lessons Learned, Nat. Hazards, 68: 53-78.
- RICHTER, P. (2008): Architekturpsychologie. Eine Einführung, 3. Auflage, Lengerich: Pabst Science Publishers.
- RITTERFELD, U. (1996): Psychologie der Wohnästhetik: Wie es uns gefällt. Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- ROHRMANN, B. (1988): Gestaltung von Umwelt. In: Frey, D., Hoyos, C. & Stahlberg, D., Angewandte Psychologie. Ein Lehrbuch, München, Psychologische Verlagsunion, 265-282.
- ROSENFELD, A. (1984): Multiresolution Image Processing and Analysis. Berlin: Springer-Verlag.

- ROTTENSTEINER, F. & BRIESE, C. (2002): A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LiDAR data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34: 295-301.
- SABINS, F.F. (1997): *Remote Sensing*. New York: Ed. H. Holder, W. H. Freeman and Company.
- SANDAU, R. (2010): *Digital airborne Camera. Introduction and Technology*. Dordrecht: Springer.
- SCHIRMER, P.M. & AXHAUSEN, K.W. (2014): A multiscale classification of the urban morphology. 2nd Symposium on Transport and Land Use Research, June 24-27, Delft, NL.
- SCHNEIDER, G. (1990): Umweltästhetik. In: Kruse, L., GRAUMANN, C.-F. & LANTERMANN (Eds.), *Ökologische Psychologie*, München: Psychologie Verlags Union.
- SCHOWENGERDT, R. A. (1997): *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. Second Edition. San Diego: Academic Press.
- SCHREER, O. (2005): *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.
- SPRECKELS, V., MUSIEDLAK, J., WEGMÜLLER, U., STROZZI, T. & WICHLACZ, H.C. (2001): Nutzung von InSAR-Daten zur großflächigen Erfassung von topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG) 43. DMV-Tagung, Trier, 49-70.
- SÖRGEL, U. (2003): *Iterative Verfahren zur Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden in SAR- und InSAR-Daten*. Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Hannover.
- SOILLE P. (1998): *Morphologische Bildverarbeitung. Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- STEINBRECHER, R. (2005): *Bildverarbeitung in der Praxis*. 2. Auflage. München Wien: Oldenbourg Verlag.
- TOGNOLI, J. (1987): Residual environment. In: STOKOLS, D. & ALTMAN, E. (Eds.), *Handbook of environmental psychology*, New York: Plenum, 655-690.
- TRIMBLE eCOGNITION (2015): *Reference Book*. Version 9.1. Trimble Germany GmbH, München.
- TROSSET, A.-M., BUCHER, T. & LEHMANN, F. (2009): Adaption of building extraction rule sets derived from MFC3 and UltraCamD aerial image data sets. *Proc. SPIE* 7478.
- WINTER, E. (1997): *Zur Ästhetik von Bauwerken und Hausfassaden. Eine Untersuchung über die Wirkung von Fassaden auf den Betrachter*. Diplomarbeit, Universität Wien, Lehrstuhl für Psychologie.

WOLTER, B. (2006): Die Gestalt des urbanen Raumes. Dissertation, Technische Universität Dresden.

WURM, M. (2013): Verknüpfung von Fernerkundungsdaten und Survey-Daten (SOEP und BASE-II) in städtischen Räumen für sozialwissenschaftliche Analysen. Dissertation, Universität Graz.

Quellenverzeichnis

- ARGEBAU (2013): Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz. Auslegungsfragen zur Energiesparverordnung – Teil 19. Online im Internet: http://www.enev-online.com/enev_2014_praxisdialog/140811_19.04_dibt_ermittlung_gebaeudenutzflaeche_an.pdf [Stand: 15.10.2015].
- BBU (2015): Marktmonitor 2015. Online im Internet: https://bbu.de/sites/default/files/publications/inhalt_aus_bbu_mm_2015_innenseiten_druck.pdf und https://bbu.de/sites/default/files/press-releases/mm_2015_pressemappe_final_.pdf. Gesichtet: 04.November 2015.
- BAUNETZ WISSEN (2015): Altbau. Baualtersstufen Gründerzeit/Jahrhundertwende. Online im Internet: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Altbaumodernisierung_Baualterstufe-Gruenderzeit_Jahrhundertwende_148198.html [Stand: 15.10.2015].
- BAURECHT (2001): Bauordnung für Berlin (BauO Bln). Online im Internet: <http://www.baurecht.de/landesbauordnung-Berlin.html#Begriffe> [Stand: 14.10.15].
- BBR (1993): WHH Wohnhochhäuser. Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise. Online im Internet: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/dokumente/3-4-01-3-wohnhochhaeuser.pdf> [Stand: 15.10.2015].
- BBSR (2014a): Wohnungsbauserie Q3a. Online im Internet: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/dokumente/3-2-2-11-wohnungsbauserie-q3a.pdf> [Stand: 15.10.2015].
- BBSR (2014c): Wohnungsbauserie P2 mit Ratiosstufen. Online im Internet: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/dokumente/3-4-0-wohnungsbauserie-p2-mit-ratiostufen.pdf> (Stand: 15.10.2015).
- BBSR (2014b): Wohnungsbauserie WBS 70. Online im Internet: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/dokumente/3-4-17-wohnungsbauserie-wbs70.pdf> (Stand: 15.10.2015a).
- BBSR (2014d): Wohnhochhäuser (WHH), Bsp: WHH GT 18/21 (Berlin). Online im Internet: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/dokumente/3-4-15-whh-gt18-21-Berlin.pdf> [Stand: 15.10.2015].
- BUNDESMINISTERIUM für RAUMORDNUNG, BAUWESEN und STÄDTEBAU (Hrsg.) (1993): - WHH Wohnhochhäuser. Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise. Bonn – Online in Internet: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/dokumente/3-4-01-3-wohnhochhaeuser.pdf> [Stand: 2015-09-02].
- ESRI RESOURCES (2013): Funktionsweise des Werkzeugs “Neigung”. Online in Internet: [http://resources.arcgis.com/de/help/main/10.1/index.html#//00q90000001r000000\[Stand: 9/11/2013\]](http://resources.arcgis.com/de/help/main/10.1/index.html#//00q90000001r000000[Stand: 9/11/2013]). Gesichtet 11.Oktober2015.

- ESRI RESOURCES (2014): Ausrichtung (Spatial Analyst. Online in Internet:
<http://resources.arcgis.com/de/help/main/10.2/index.html#//009z000000tr000000>,
 Stand: [6/5/2014]. Gesichtet 11. Oktobert.15.
- FH-DORTMUND (2015): E-Learning Plattform zum Thema Bildverarbeitung für die
 Objekterkennung. Pyramid Linking. Online im Internet:
https://kik.informatik.fh-dortmund.de/abschlussarbeiten/chameleon/chapters/hybrid_segmentation/pyramidlinking.html Stand [31.10.2015].
- GESETZ über das VERMESSUNGSWESEN in Berlin (VermGBln) in der Fassung vom 09. Januar 1996:
 Dritter Teil Liegenschaftskataster. Berlin.
http://gesetze.berlin.de/jportal/portal/t/1kqr/page/bsbeprod.psml/action/portlets.jw.MainAction?p1=k&eventSubmit_doNavigate=searchInSubtreeTOC&showdoccase=1&doc.hl=0&doc.id=jlr-VermGBEpP15&doc.part=S&toc.poskey=#focuspoint [Stand: 2015-09-02].
- GREIF, B. (2007): Microsoft kartographiert Städte mit 216-Megapixel-Kamera. *ZDNet / News*
 Internet: <http://www.zdnet.de/39154704/microsoft-kartografiert-staedte-mit-216-megapixel-kamera/>. Gesichtet: 04.Juli.2013.
- IBB Wohnungsmarktbarometer (2015): Der Berliner Wohnungsmarkt aus Expertensicht. Online
 im Internet:
http://www.ibb.de/portaldata/1/resources/content/download/ibb_service/publikationen/IBB_Wohnungsmarktbarometer_2015.pdf. Gesichtet: 03. November 2015.
- INSTITUT für RAUMENTWICKLUNG (IRAP) (2006): Lichte Höhe Geschosshöhe, Themenblatt Nr. 10,
 Rapperswill – Online in Internet:
http://irap.hsr.ch/fileadmin/user_upload/irap.hsr.ch/Publikationen/Projektberichte/Normen%20und%20Harmonisierung%20der%20Bau-%20und%20Planungsgesetzgebung/pdf_Themenblaetter/10_S_Th.blatt.010LichteHoehe.pdf [Stand: 01.09.2015].
- KLAUS, R., PRESCHKE, K. & BURKHARDT, H.: Bildverarbeitung. Online im Internet:
http://lmb.informatik.uni-freiburg.de/lectures/praktika_brox/bvpraktikum/BVAnl_bildvor.pdf [Stand: 26.10.2015].
- LANG, B. (2013): Vorlesung Bildverarbeitung. Hochschule Osnabrück. Online in Internet:
[file:///C:/Users/Larsen/Downloads/10_Merkmalgewinnung_und_Klassifikation%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Larsen/Downloads/10_Merkmalgewinnung_und_Klassifikation%20(1).pdf). Gesichtet 05.November 2015.
- POZNANSKA, A.M. & BAYER, S. (2014): Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen in
 Berlin. Ergebnisdokumentation. Berlin. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und
 Umwelt. Abteilung III Geoinformation Referat III F Informationssystem Stadt und
 Umwelt.
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/download/0610_Ausgabe_2013_Endbericht_Gebaeude_Vegetationshoehen_Berlin.pdf [Stand: [26.09.2015].

- SENSTADT (2007): Die Bauordnung für Berlin. Online im Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/service/gesetzestexte/de/download/bauen/20070730_broschuere_internet.pdf [Stand:15.10.2015].
- SENSTADT (2011): Bauordnung für Berlin (BauO Bln). Online im Internet:
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/service/gesetzestexte/de/download/bauen/BauOBln.pdf> [Stand: 15.10.2015].
- SENSTADTUM 1 (2015): Geoportal. Liegenschaftskataster: Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK-Berlin). Online in Internet:
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/liegenschaftskataster/alk.shtml> [Stand: 11.10.15].
- SENSTADTUM 2 (2015): Geoportal Berlin. Umweltatlas. Online in Internet:
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/index.shtml> [Stand: 11.10.15].
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Referat VI D – Oberste Bauaufsicht (2011): Bauordnung für Berlin. - Online in Internet:
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/service/gesetzestexte/de/download/bauen/BauOBln.pdf> [Stand: 01.09.2015].
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2011): Umweltatlas Berlin. 06.07 Stadtstruktur / 06.08 Stadtstruktur differenziert. Berlin.
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/dd607_01.htm#Abb1 . [Stand: 22.08. 2015].
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2013): Verkehrsdaten. Teilverkehrszellen und Verkehrszellen. Informationen. Berlin.
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/verkehr/datengrundlagen/verkehrszellen/de/informationen.shtml> [Stand: 22.09.2015].
- WIEDEMANN, A. & WICKI, P. (2010): Mythos True Orthophotos. Vom Sinn und Unsinn eines Produktes.
http://www.bsf-swissphoto.com/user_websites/bsf/files/268/2010-07_Mythos_True_Orthophotos.pdf . Gesichtet: 01.Oktober 2015.
- TRIMBLE ECOGNITION (2015): Trimble Documentation. Reference Book. Version 9.1. Trimble Germany GmbH. München.
- WIKIPEDIA (2015a): Orthophoto. Online im Internet:
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/51/OrthoPerspective.svg/2000px-OrthoPerspective.svg.png> [Stand: 10.10.159].
- WIKIPEDIA (2015b): Liste der Hochhäuser in Berlin. Online im Internet:
https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Hochh%C3%A4user_in_Berlin [Stand: 12.10.2015].

Anhänge

Anhang 6.A zu Kapitel 6

Genauigkeitsanalyse des Untersuchungsgebietes II

Dieser Anhang 6.A fasst die Genauigkeitsanalyse der objektbasierten Klassifizierung aus dem 6. Kapitel für das Untersuchungsgebiet II zusammen.

	Wasser	Dach- begrün- ung	Gebäude	Vegetation erhöht	Vegetation am Grund	Unklassi- fizierte Fläche	Zeilen- summe
Wasser	1						1
Dachbegrünung		7		4			11
Gebäude			249	24	9	12	294
Vegetation erhöht		3	19	284	5	3	314
Vegetation am Grund			21	7	176	25	229
Unklassifizierte Fläche			32	12	15	240	299
Spaltensumme	1	10	321	331	205	280	1148
Hersteller- genauigkeit	100 %	70,0 %	77,6 %	85,8 %	85,9 %	85,7 %	
Nutzer- genauigkeit	100 %	63,6 %	84,7 %	90,4 %	76,9 %	76,4 %	

Gesamtgenauigkeit: 83,4%

Tab. 6.A.1 Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung der aus der OBIA klassifizierten Ergebnisse und dem Luftbilddatensatz im Untersuchungsgebiet II in Form einer Konfusionsmatrix (vgl. Tab 6.3).

Gebäudeklasse	Klassifikations- ergebnis in m ²	ALK Grundriss- fläche in m ²	Prozentuale Überein- stimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	154	-	-
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	159	474	33,5 %
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	12.992	30.846	42,1 %
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	22.605	62.245	36,3 %
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	2.150.205	2.106.559	102,1 %
Gebäude unter 3 Etagen	420.955	136.215	309 %
Einfamilienwohnhaus	103.802	160.221	64,8%
Gebäude mit spezieller Nutzung	109.753	42.597	257,7 %
Gesamtfläche Gebäude	2.820.625	2.539.057	111,1 %

Tab. 6.A.2 Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse im Untersuchungsgebiet II mit der Grundrissfläche der ALK (vgl. Tab. 6.4).

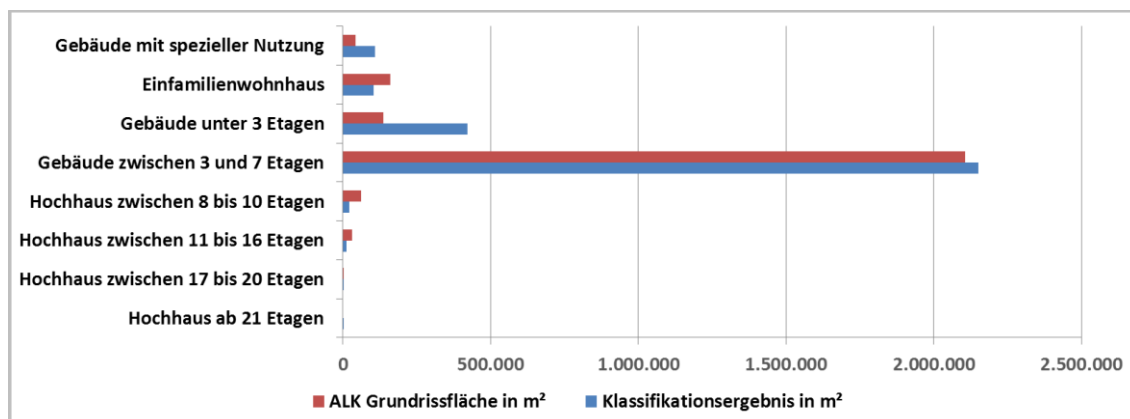


Abb. 6.A.1 Graphische Darstellung der Klassifikationsergebnisse mit der Grundrissfläche der ALK (vgl. Abb. 6.10).

Gebäudeklasse	Bereinigtes Klassifikations- ergebnis nach ALK in m²	ALK Grundrissfläche in m²	Prozentuale Überein- stimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	-	-	-
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	-	474	-
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	8.677	30.846	28,1%
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	13.760	62.245	22,1%
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	2.095.974	2.106.559	99,5%
Gebäude unter 3 Etagen	123.119	136.215	90,4%
Einfamilienwohnhaus	58.904	160.221	36,8%
Gebäude mit spezieller Nutzung	38.538	42.497	90,7%
Gesamtfläche Gebäude	2.338.972	2.539.057	92,1%

Tab. 6.A.3: Gegenüberstellung der ALK-bereinigten Klassifikationsergebnisse mit der ALK-Grundrissfläche (vgl. Tab. 6.5).

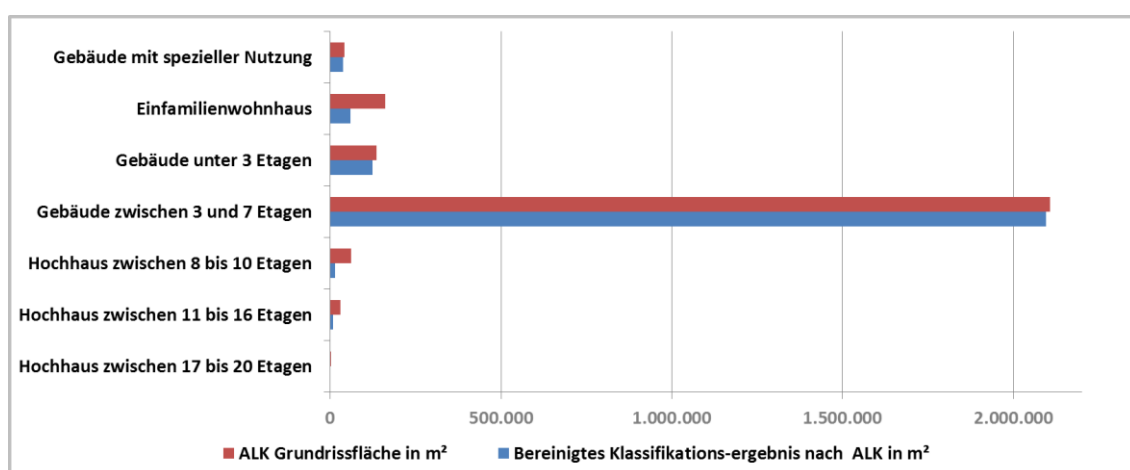


Abb. 6.A.2 Graphische Darstellung der Ergebnisse der Verschneidung der aus der OBIA gewonnen Gebäudeklassen und den Grundrissflächen der ALK (vgl. Abb. 6.12).

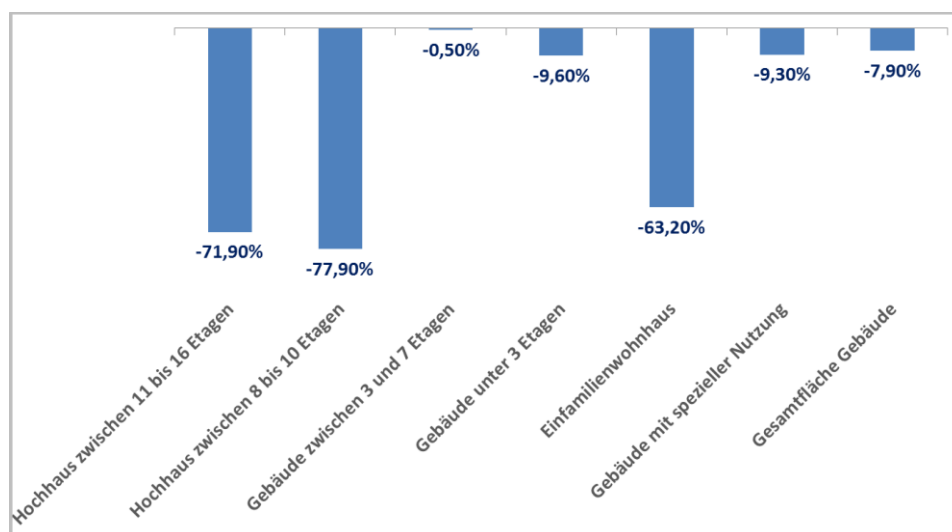


Abb. 6.A.3 Prozentuale Unterklassifizierung der aus der OBIA gewonnen Gebäudeklassen und den Grundrissflächen der ALK (vgl. Abb. 6.13).

Gebäudeklasse	Klassifikations- ergebnis in m ²	Bereinigtes Klassifikations- ergebnis nach ALK in m ²	Prozentuale Überein- stimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	154	-	-
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	159	-	-
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	12.992	8.677	149,8 %
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	22.605	13.760	164,3 %
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	2.150.205	2.095.974	102,6 %
Gebäude unter 3 Etagen	420.955	123.119	341,9 %
Einfamilienwohnhaus	103.802	58.904	222,1 %
Gebäude mit spezieller Nutzung	109.753	38.538	284,8 %
Gesamtfläche Gebäude	2.820.625	2.338.972	121,1 %

Tab. 6.A.4 Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit den bereinigten Ergebnissen aus dem ALK-Datensatz (vgl. Tab. 6.6).

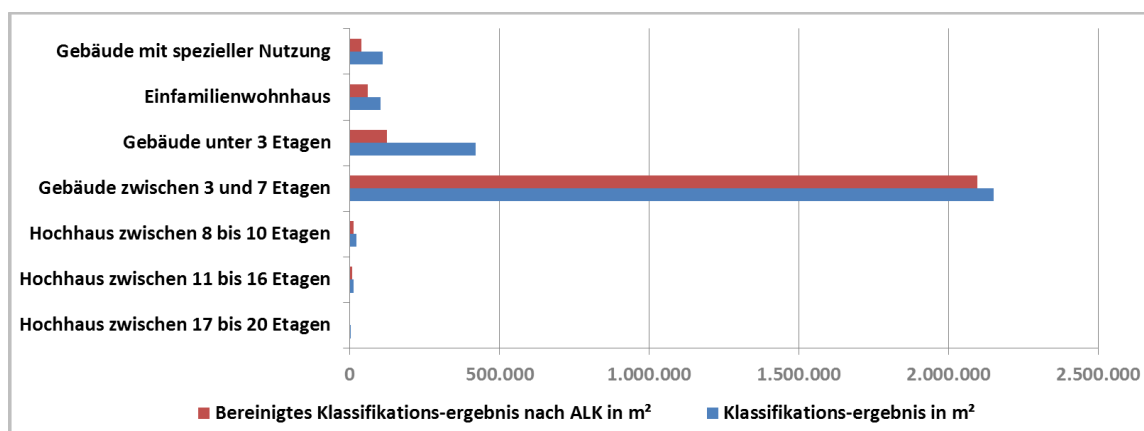


Abb. 7.A.4: Graphische Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit den aus der ALK bereinigten Ergebnissen (vgl. Abb. 6.17).

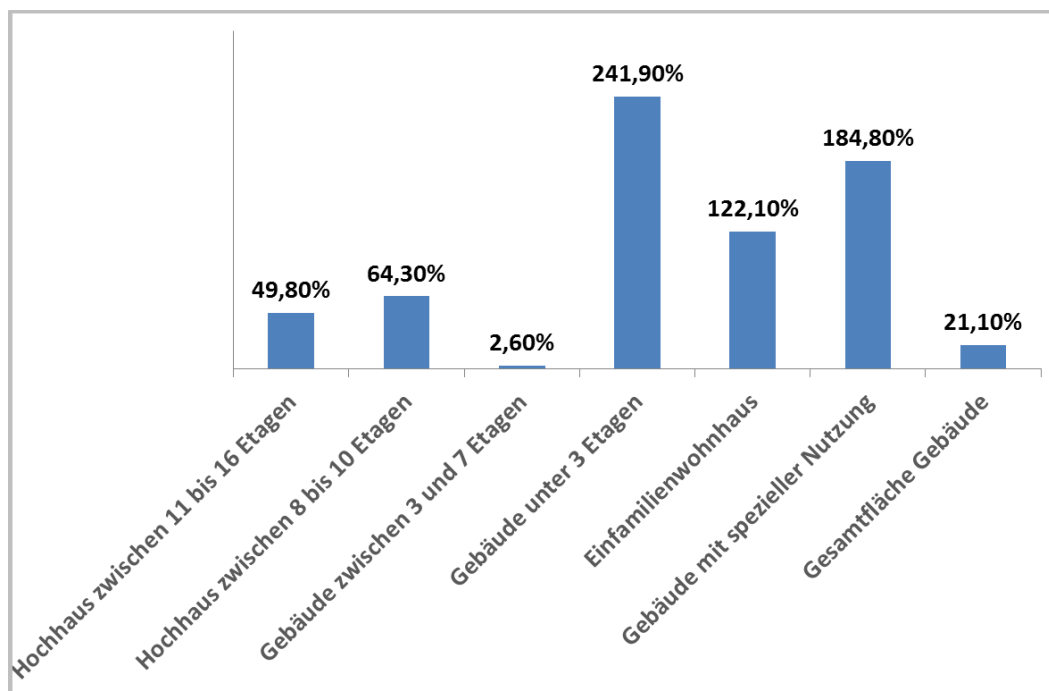


Abb. 6.A.5 Überklassifizierung des Klassifikationsergebnisses im Vergleich zu den aus der ALK bereinigten Ergebnissen (vgl. Abb. 6.18).

Andere Klassen	Klassifikationsergebnis in m ²
Dachbegrünung	61.091
Balkon	719
Vegetation am Grund	1.965.255
Vegetation erhöht	3.123.698
Wasserflächen	6.783
Gesamtfläche Gebäude	2.820.625
unklassifizierte Fläche	2.848.891

Tab. 6.A.5 Extrahierte Flächen der OBIA des Untersuchungsgebietes I in m² an (vgl. Tab. 6.7).

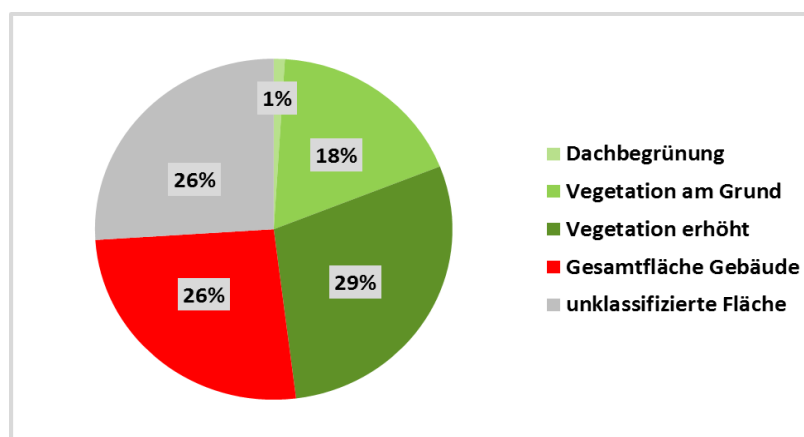


Abb. 6.A.6: Verteilung der durch die OBIA extrahierten Flächen. Balkon und Wasserflächen sind in dieser Darstellung wegen ihrer prozentualen Geringfügigkeit nicht ausgewiesen (vgl. Abb. 6.19).

Gebäudeklasse	Klassifikations- ergebnis / Anzahl der Gebäude	ALK / Anzahl der Gebäude	Prozentuale Überein- stimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	1	-	-
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	1	1	100 %
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	16	9	177,8 %
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	52	92	56,5 %
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	759	5.316	14,3 %
Gebäude unter 3 Etagen	727	187	367,2 %
Einfamilienwohnhaus	826	2010	55,7 %
Gebäude mit spezieller Nutzung	11	2	550 %

Tab. 6.A.6 Gegenüberstellung der Gebäudeanzahl der OBIA mit denen in der ALK verzeichneten Gebäuden (vgl. Tab. 6.8).

Gebäudeklasse	Bereinigtes Klassifikations- ergebnis / Anzahl der Gebäude	ALK / Anzahl der Gebäude	Prozentuale Überein- stimmung
Hochhaus ab 21 Etagen	-	-	-
Hochhaus zwischen 17 bis 20 Etagen	-	1	-
Hochhaus zwischen 11 bis 16 Etagen	8	9	88,9%
Hochhaus zwischen 8 bis 10 Etagen	25	92	27,2 %
Gebäude zwischen 3 und 7 Etagen	731	5.316	13,8 %
Gebäude unter 3 Etagen	129	187	69 %
Einfamilienwohnhaus	386	2010	19,2 %
Gebäude mit spezieller Nutzung	2	2	100 %

Tab. 6.A.7 Gegenüberstellung der Gebäudeanzahl des bereinigten OBIA-Ergebnisses aus der ALK und dem ALK-Datensatz selbst (vgl. Tab. 6.9).

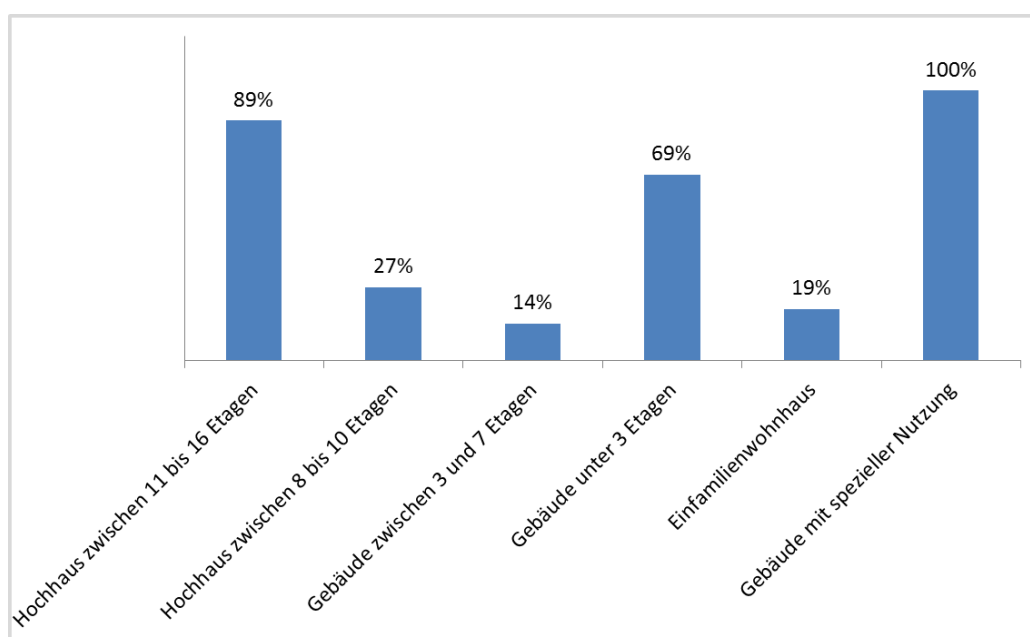


Abb. 6.A.7: Prozentuale Genauigkeit an, mit der das bereinigte Klassifikationsergebnis mit der ALK übereinstimmt.

Anhang 7.A zu Kapitel 7

Dieser Anhang fasst die für die Attraktivitätsanalyse ermittelten Größen tabellarisch zusammen.

ID	TVZ	TVZ in m ²	Fläche Gebäude in m ²	Bebauungsanteil in %	unklassifiziert in %	Fläche Balkon in m ²	mittlere Gebäudehöhe in m	höchste Gebäudehöhe in m	niedrigste Gebäudehöhe in m	Differenz der höchsten und niedrigsten Gebäudehöhe in m	Gebäudevolumen in m ³
1	10911	267.493	58.220	21,77	50,13		9,90	30,70	3,70	27,00	8.733
2	10912	286.819	63.500	22,14	35,01	46	10,90	33,37	2,85	30,52	9.525
3	10921	345.073	90.814	26,32	44,53	17	12,01	62,40	1,78	60,62	13.622
4	10922	237.874	37.988	15,97	27,59	7	9,98	34,47	3,74	30,73	5.698
5	10923	626.010	32.102	5,13	14,50		6,36	27,00	3,65	23,35	4.815
6	11211	143.298	26.184	18,27	44,16		11,40	22,40	1,83	20,57	3.927
7	11212	433.682	100.492	23,17	42,22		8,97	18,64	3,79	14,85	15.073
8	11521	188.074	79.340	42,19	32,79	3	12,10	30,70	3,60	27,10	11.901
9	11522	132.626	77.879	58,72	23,75		14,20	20,80	6,70	14,10	11.681
10	11523	175.790	85.251	48,50	10,54		10,70	21,16	3,60	17,56	12.787
11	11524	149.989	77.506	51,67	12,27	11	13,29	28,70	3,65	25,05	11.625
12	11525	238.290	161.705	67,86	16,13		10,81	25,08	3,60	21,48	24.255
13	11526	394.423	127.031	32,21	37,82	6	11,90	29,10	3,60	25,50	19.054
14	14911	417.683	83.404	19,97	24,94	19	10,00	30,50	3,60	26,90	12.510
15	14912	295.249	71.630	24,26	29,24	168	13,10	42,70	3,72	38,98	10.744
16	14913	298.406	85.434	28,63	33,62	60	13,34	40,10	3,82	36,28	12.815
17	14921	415.550	67.660	16,28	22,69	8	9,95	26,05	3,78	22,27	10.149
18	14922	258.610	84.698	32,75	45,61	102	8,32	33,82	3,63	30,19	12.704
19	14923	737.772	177.423	24,05	27,34		11,09	22,80	0,00	22,80	26.613
20	15011	494.506	41.965	8,49	7,33		10,20	23,30	3,40	19,90	6.294
21	15012	807.275	18.937	2,35	11,09		5,90	16,40	3,60	12,80	2.975
22	15111	657.242	41.965	6,39	42,43	12	10,20	23,30	3,40	19,90	6.294
23	15112	421.552	79.160	18,78	62,72	85	8,88	45,70	3,66	42,04	11.874
24	15113	503.870	82.187	16,31	22,83	348	11,10	33,76	0,00	33,76	12.328
25	15114	1.040.165	319.727	30,74	50,29		7,60	31,90	3,00	28,90	47.959
26	15211	416.888	53.772	12,90	31,98	176	12,40	63,90	3,58	60,32	8.065
27	15212	568.713	89.059	15,66	31,71	606	14,40	64,00	3,65	60,35	13.359
28	15213	731.837	84.002	11,48	36,31	1.828	18,60	71,90	3,40	68,50	12.600
29	15214	423.796	65.461	15,45	29,60	292	16,70	63,70	3,70	60,00	9.819
30	17721	777.872	124.231	15,97	26,01	253	8,70	63,60	0,00	63,60	18.634
31	17811	558.034	114.544	20,53	39,44	15	7,90	29,80	3,60	26,20	17.181
32	17911	396.084	73.485	18,55	44,01	6	6,90	28,00	3,60	24,40	11.022
33	17912	593.498	49.404	8,32	9,82		8,50	16,20	3,60	12,60	7.410
34	17913	413.952	25.794	6,23	29,56		8,20	27,40	3,60	23,80	3.869
35	17914	467.114	141.853	30,37	31,01		9,80	23,60	2,60	21,00	21.278
36	17915	325.523	80.191	24,63	28,89		10,10	23,40	3,60	19,80	12.028
37	17916	454.548	83.412	18,35	35,02		8,50	22,60	3,60	19,00	12.511
38	17921	314.577	47.749	15,18	37,71	586	20,10	63,80	3,60	60,20	7.162
39	17922	429.074	91.519	21,33	27,54	291	14,70	63,60	3,40	60,20	13.727
40	17923	344.864	50.907	14,76	24,95	404	8,00	55,10	3,60	51,50	7.636
41	17931	838.846	88.832	10,59	30,77		7,10	22,20	3,30	18,90	13.324
Gesamt		18.022.540	3.436.417			5.349					515.580

Tab. 7.A.1 Ergebnisse der Attraktivitätsanalyse des Untersuchungsgebietes I nach TVZ (geometrische Informationen zu Flächen und Höhen).

ID	TVZ	HH ab 21 Etagen in m²	HH 17 bis 20 Etagen in m²	HH 11 bis 16 Etagen in m²	HH 8 bis 10 Etagen in m²	Flachdach- gebäude 3 bis 7 Etagen in m²	Spitzdach- gebäude 3 bis 5 Etagen in m²	Gebäude unter 3 Etagen in m²	Einfamilien- wohnhaus in m²	Gebäude mit spezieller Nutzung in m²	Gebäude- fläche gesamt in m²
1	10911				1.898	9.999	12.131	6.786	1.579	36.718	69.111
2	10912			705		19.520	11.894	21.958	807	8.456	63.340
3	10921	272		2.235	13.169	16.474	1.893	38.514	1.778	27.380	101.715
4	10922			789	920	6.203	760	22.087	7.229		37.988
5	10923				279	223		15.947	15.652		32.101
6	11211					6.446	4.266	14.053	1.420		26.185
7	11212					4.339	295	50.615	1.316	53.551	110.116
8	11521				4.576		70.033	4.509	222		79.340
9	11522					1.758	73.196	2.742	182		77.878
10	11523					3.918	74.277	6.201	855		85.251
11	11524				5.092	9.239	59.022	3.955	197		77.505
12	11525				123		153.661	7.435	486		161.705
13	11526				3.038	10.143	93.428	19.523	898		127.030
14	14911				275	14.551	42.577	14.173	3.106	8.721	83.403
15	14912			1.590	3.850	15.997	40.007	9.140	1.046		71.630
16	14913			6.235	3.071	24.678	29.983	20.842	624		85.433
17	14921				153	23.403	19.406	15.497	3.887	5.312	67.658
18	14922		2.320			5.995	454	16.834	1.789	34.187	61.579
19	14923					23.670	111.426	38.281	4.045		177.422
20	15011					4.485	5.918	28.858	2.693		41.954
21	15012					825	17.667	14.813	2.431		35.736
22	15111			173		8.066	1.578	37.060	4.306	38.280	89.463
23	15112			2.134		20.221		10.150	1.610	45.045	79.160
24	15113			8.432	1.877	18.352		32.317	1.511	19.697	82.186
25	15114				1.585	11.537	20.457	151.450	11.020	123.676	319.725
26	15211	668	675	3.097	13.894	18.718	5.427	9.967	1.323		53.769
27	15212	674	1.685	15.874	9.181	29.128	11.974	22.039	1.354		91.909
28	15213	3.034	2.057	27.459	11.989	7.117	5.341	26.287	736		84.020
29	15214	1.384	1.393	8.792	18.106	20.640	501	14.465	178		65.459
30	17721	687	691	7.975	189	29.030	7.405	36.381	33.091	8.789	124.238
31	17811				1.020	12.922	19.036	41.606	7.997	31.962	114.543
32	17911				428	10.235	2.764	29.540	4.162	26.353	73.482
33	17912					4.712	2.678	19.270	22.744		49.404
34	17913				176	1.952	3.972	6.925	12.768		25.793
35	17914					33.671	25.992	52.149	5.346	24.693	141.851
36	17915					14.104	33.396	29.063	3.627		80.190
37	17916					8.870	2.603	9.543	1.635	60.760	83.411
38	17921	651	1.991	10.277	848	11.722	1.268	13.381	615	6.993	47.746
39	17922	653	570	8.845	6.156	40.897	5.590	14.551	675	13.581	91.518
40	17923		758	5.485	4.877	14.107		8.342	17.378		50.947
41	17931					6.541	15.191	24.913	22.845	19.341	88.831
Gesamt		8.023	12.140	110.097	106.770	524.408	987.467	962.162	207.163	593.495	3.511.725

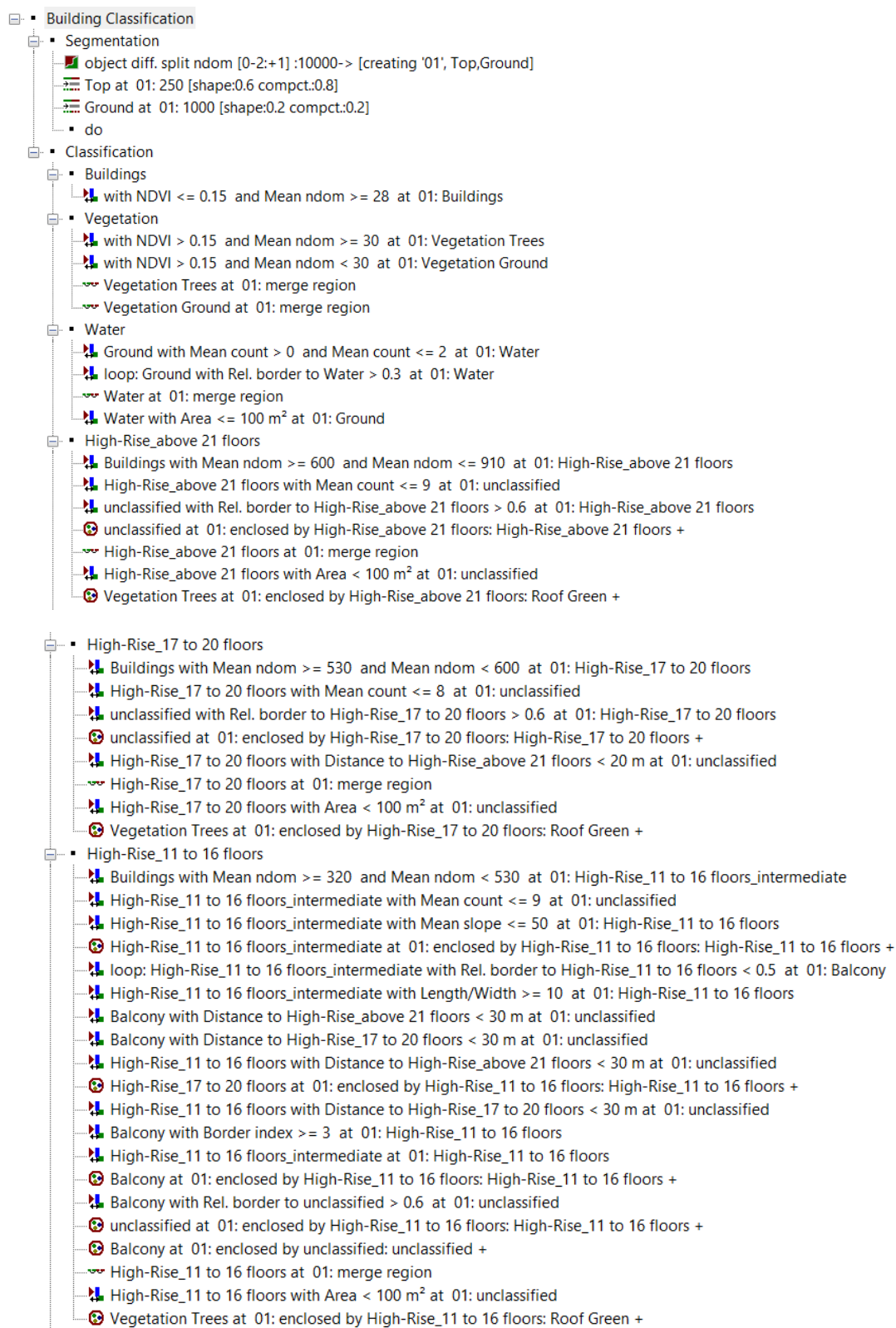
Tab. 7.A.2 Ergebnisse der Attraktivitätsanalyse des Untersuchungsgebietes I nach TVz (geometrische Informationen zu den einzelnen Gebäudeklassen).

ID	TVZ	TVZ in m²	Fläche erhöhte Vegetation in m²	Anteil Baum in %	Fläche Bodenvegetation in m²	Anteil Bodenvegetation in %	Anteil Vegetation gesamt in %	Fläche Dachgrün in m²	Anteil Dachbegrünung in %	Fläche Wasser m²
1	10911	267493	37960	14,2	37215	13,9	28,1	37752	14,1	
2	10912	286819	61504	21,4	61388	21,4	42,9	106	0,0	
3	10921	345073	54687	15,9	45913	13,3	29,2	386	0,1	
4	10922	237874	69288	29,1	64958	27,3	56,4	64	0,0	
5	10923	626010	260167	41,6	242974	38,8	80,4	228	0,0	
6	11211	143298	2129	1,5	51712	36,1	37,6	182	0,1	
7	11212	433682	26268	6,1	123820	28,6	34,6	3023	0,7	
8	11521	188074	29825	15,9	17237	9,2	25,0	753	0,4	
9	11522	132626	12495	9,4	10757	8,1	17,5	979	0,7	
10	11523	175790	44036	25,1	27980	15,9	41,0	216	0,1	
11	11524	149989	28540	19,0	25534	17,0	36,1	417	0,3	
12	11525	238290	21948	9,2	16202	6,8	16,0	2391	1,0	
13	11526	394423	61492	15,6	56728	14,4	30,0	2818	0,7	
14	14911	417683	133638	32,0	96476	23,1	55,1	1627	0,4	
15	14912	295249	81937	27,8	55355	18,8	46,5	345	0,1	
16	14913	298406	55042	18,5	57606	19,3	37,8	663	0,2	
17	14921	415550	118633	28,6	134976	32,5	61,0	1034	0,3	
18	14922	258610	20324	7,9	35642	13,8	21,6	7	0,0	
19	14923	737772	204745	27,8	153869	20,9	48,6	2211	0,3	
20	15011	494506	316916	64,1	99390	20,1	84,2	164	0,0	
21	15012	807275	354249	43,9	344562	42,7	86,6	125	0,0	
22	15111	657242	124661	19,0	211758	32,2	51,2	642	0,1	4091,00
23	15112	421552	29987	7,1	48000	11,4	18,5	9116	2,2	
24	15113	503870	184918	36,7	121747	24,2	60,9	79	0,0	
25	15114	1040165	74719	7,2	122625	11,8	19,0	3076	0,3	
26	15211	416888	100128	24,0	129649	31,1	55,1	59	0,0	
27	15212	568713	162252	28,5	137054	24,1	52,6	2399	0,4	
28	15213	731837	196772	26,9	185307	25,3	52,2	1356	0,2	14900,00
29	15214	423796	134429	31,7	98445	23,2	55,0	853	0,2	
30	17721	777872	180859	23,3	270431	34,8	58,0	3433	0,4	
31	17811	558034	87590	15,7	135784	24,3	40,0	511	0,1	
32	17911	396084	50521	12,8	97749	24,7	37,4	330	0,1	
33	17912	593498	289668	48,8	196162	33,1	81,9	897	0,2	
34	17913	413952	155136	37,5	110648	26,7	64,2	218	0,1	55584,00
35	17914	467114	77737	16,6	102675	22,0	38,6	410	0,1	
36	17915	325523	72966	22,4	78307	24,1	46,5	209	0,1	
37	17916	454548	45363	10,0	166574	36,7	46,6	459	0,1	
38	17921	314577	66080	21,0	82106	26,1	47,1	1198	0,4	
39	17922	429074	116767	27,2	102635	23,9	51,1	5930	1,4	
40	17923	344864	80978	23,5	126937	36,8	60,3	512	0,2	
41	17931	838846	125332	14,9	366542	43,7	58,6	9107	1,1	
Gesamt		18022540	4352683		4651428			96285		74575,00

Tab. 7.A.3 Ergebnisse der Attraktivitätsanalyse des Untersuchungsgebietes I nach TVz (Umfeld: Vegetation und Wasser).

Anhang 7.B Regelkette

Regelkette der automatisierten objektbasierten Klassifizierung in eCognition



- High-Rise_8 to 10 floors
 - 🚧 Buildings with Mean ndom ≥ 250 and Mean ndom < 320 at 01: High-Rise_8 to 10 floors_intermediate
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate with Mean count ≤ 9 at 01: unclassified
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate with Mean slope ≤ 50 at 01: High-Rise_8 to 10 floors
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate with Brightness RGB < 15000 at 01: unclassified
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate at 01: enclosed by High-Rise_8 to 10 floors: High-Rise_8 to 10 floors +
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate with Length/Width ≥ 10 at 01: High-Rise_8 to 10 floors
 - 🚧 Balcony at 01: enclosed by High-Rise_8 to 10 floors: High-Rise_8 to 10 floors +
 - 🚧 High-Rise_11 to 16 floors with Rel. border to High-Rise_8 to 10 floors > 0.5 and Mean ndom ≤ 350 at 01: High-Rise_8 to 10 floors
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate at 01: merge region
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate with Area $> 100 \text{ m}^2$ at 01: High-Rise_8 to 10 floors
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate with Area $< 2 \text{ m}^2$ at 01: unclassified
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors with Rel. border to Buildings ≥ 0.6 at 01: unclassified
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate with Rel. border to Buildings ≥ 0.6 at 01: unclassified
 - 🚧 unclassified at 01: enclosed by High-Rise_8 to 10 floors: High-Rise_8 to 10 floors +
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors_intermediate with Border index ≥ 3 at 01: High-Rise_8 to 10 floors
 - 🚧 loop: High-Rise_8 to 10 floors_intermediate at 01: Balcony
 - 🚧 Balcony at 01: merge region
 - 🚧 Balcony with Area $\geq 100 \text{ m}^2$ at 01: High-Rise_8 to 10 floors
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors at 01: merge region
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors with Area $< 100 \text{ m}^2$ at 01: unclassified
 - 🚧 Vegetation Trees at 01: enclosed by High-Rise_8 to 10 floors: Roof Green +
 - 🚧 Balcony with Area $< 2 \text{ m}^2$ at 01: unclassified
 - 🚧 Vegetation Trees with Rel. border to Buildings > 0.7 at 01: Roof Green
- Flat Roof_Buildings_3 to 7 floors
 - 🚧 Buildings with Mean ndom ≥ 130 and Mean ndom < 250 at 01: Flat Roof_Buildings_3 to 7 floors_intermediate
 - 🚧 Flat Roof_Buildings_3 to 7 floors_intermediate with Mean count ≤ 8 at 01: unclassified
 - 🚧 Flat Roof_Buildings_3 to 7 floors_intermediate at 01: merge region
 - 🚧 Flat Roof_Buildings_3 to 7 floors_intermediate with Mean slope < 50 at 01: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors
 - 🚧 Flat Roof_Buildings_3 to 7 floors_intermediate with Mean slope ≥ 50 at 01: Pitched Roof_3 to 5 floors
 - 🚧 Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors at 01: enclosed by Pitched Roof_3 to 5 floors: Pitched Roof_3 to 5 floors +
 - 🚧 Pitched Roof_3 to 5 floors at 01: enclosed by Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors +
 - 🚧 unclassified with Brightness RGB ≥ 15000 at 01: enclosed by Pitched Roof_3 to 5 floors: Pitched Roof_3 to 5 floors +
 - 🚧 unclassified at 01: enclosed by Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors +
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors with Mean ndom ≤ 280 at 01: enclosed by Pitched Roof_3 to 5 floors: Pitched Roof_3 to 5 floors +
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors with Mean ndom ≤ 280 at 01: enclosed by Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors +
 - 🚧 Balcony at 01: enclosed by Pitched Roof_3 to 5 floors: Pitched Roof_3 to 5 floors +
 - 🚧 Balcony at 01: enclosed by Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors +
 - 🚧 High-Rise_8 to 10 floors with Rel. border to Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors > 0.5 at 01: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors
 - 🚧 Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors at 01: merge region
 - 🚧 Pitched Roof_3 to 5 floors at 01: merge region
 - 🚧 Pitched Roof_3 to 5 floors with Area $< 100 \text{ m}^2$ at 01: unclassified
 - 🚧 Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors with Area $< 100 \text{ m}^2$ at 01: unclassified

- Buildings_below 3 floors
 - Buildings_below 3 floors with Area < 50 m² at 01: unclassified
 - Buildings with Mean ndom < 130 at 01: Buildings_below 3 floors
 - Buildings_below 3 floors with Mean count <= 7 at 01: unclassified
 - Buildings_below 3 floors with Rel. border to Pitched Roof_3 to 5 floors > 0.5 at 01: Pitched Roof_3 to 5 floors
 - Buildings_below 3 floors at 01: enclosed by Pitched Roof_3 to 5 floors: Pitched Roof_3 to 5 floors +
 - unclassified with Rel. border to Pitched Roof_3 to 5 floors > 0.6 at 01: Pitched Roof_3 to 5 floors
 - unclassified with Rel. border to Buildings_below 3 floors > 0.6 at 01: Buildings_below 3 floors
 - unclassified at 01: enclosed by Buildings_below 3 floors: Buildings_below 3 floors +
 - unclassified at 01: enclosed by Pitched Roof_3 to 5 floors: Pitched Roof_3 to 5 floors +
 - Ground at 01: enclosed by Buildings_below 3 floors: Buildings_below 3 floors +
 - Pitched Roof_3 to 5 floors at 01: merge region
 - Buildings_below 3 floors at 01: merge region
 - Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors with Rel. border to Buildings_below 3 floors > 0.5 and Mean ndom <= 160 at 01: Buildings_below 3 floors
 - Pitched Roof_3 to 5 floors with Rel. border to Buildings_below 3 floors > 0.5 and Mean ndom <= 160 at 01: Buildings_below 3 floors
 - Vegetation Trees at 01: enclosed by Buildings_below 3 floors: Roof Green +
 - Buildings_below 3 floors at 01: merge region
 - Buildings_below 3 floors with Area < 300 m² and Rel. border to sem_geb = 0 at 01: Detached House
 - Buildings_below 3 floors with Rel. border to Pitched Roof_3 to 5 floors > 0.5 at 01: Pitched Roof_3 to 5 floors
 - Buildings_below 3 floors with Rel. border to Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors > 0.5 at 01: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors
 - Detached House with Area < 20 m² at 01: unclassified
 - Detached House with Distance to High-Rise_above 21 floors < 30 m at 01: unclassified
 - Detached House with Distance to High-Rise_17 to 20 floors < 30 m at 01: unclassified
 - Detached House with Distance to High-Rise_11 to 16 floors < 30 m at 01: unclassified
 - Detached House with Distance to High-Rise_8 to 10 floors < 30 m at 01: unclassified
 - Detached House with Distance to Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors < 10 m at 01: unclassified
 - Detached House with Distance to Pitched Roof_3 to 5 floors < 10 m at 01: unclassified
 - Buildings_below 3 floors with Distance to High-Rise_above 21 floors < 30 m at 01: unclassified
 - Buildings_below 3 floors with Distance to High-Rise_17 to 20 floors < 30 m at 01: unclassified
 - Buildings_below 3 floors with Distance to High-Rise_11 to 16 floors < 30 m at 01: unclassified
 - Buildings_below 3 floors with Distance to High-Rise_8 to 10 floors < 30 m at 01: unclassified
- CleanUp
 - Balcony with Rel. border to High-Rise_above 21 floors > 0 at 01: unclassified
 - Balcony with Rel. border to High-Rise_17 to 20 floors > 0 at 01: unclassified
 - Balcony with Rel. border to High-Rise_8 to 10 floors > 0 at 01: unclassified
 - Balcony with Rel. border to Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors > 0 at 01: unclassified
 - Balcony with Rel. border to Pitched Roof_3 to 5 floors > 0 at 01: Pitched Roof_3 to 5 floors
 - Balcony with Rel. border to Buildings_below 3 floors > 0 at 01: unclassified
 - unclassified at 01: enclosed by Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors +
 - Pitched Roof_3 to 5 floors at 01: enclosed by Buildings_below 3 floors: Buildings_below 3 floors +
 - loop: unclassified with Rel. border to High-Rise_11 to 16 floors > 0.5 and Mean ndom > 320 at 01: High-Rise_11 to 16 floors
 - loop: unclassified with Rel. border to High-Rise_8 to 10 floors > 0.5 and Mean ndom > 250 at 01: High-Rise_8 to 10 floors
 - loop: unclassified with Rel. border to Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors > 0.5 and Mean ndom > 130 at 01: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors
 - loop: unclassified with Rel. border to Buildings_below 3 floors > 0.5 at 01: Buildings_below 3 floors
 - unclassified at 01: enclosed by Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors: Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors +
 - loop: unclassified with Rel. border to Buildings_below 3 floors > 0.5 at 01: Buildings_below 3 floors
 - Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors with Rel. border to High-Rise_8 to 10 floors > 0.6 at 01: High-Rise_8 to 10 floors
 - Vegetation Ground at 01: enclosed by Buildings_below 3 floors: Buildings_below 3 floors +
 - Detached House at 01: enclosed by Roof Green: unclassified +
 - Buildings_below 3 floors at 01: merge region
 - Detached House at 01: merge region
 - Pitched Roof_3 to 5 floors at 01: merge region
 - Flat_Roof_Buildings_3 to 7 floors at 01: merge region
 - High-Rise_8 to 10 floors at 01: merge region
 - High-Rise_11 to 16 floors at 01: merge region
 - Pitched Roof_3 to 5 floors with Area < 100 m² at 01: unclassified
 - Roof Green with mean_abs_diff_neigh_ndom_geb > 20 and Standard deviation ndom > 15 at 01: Vegetation Trees
 - Buildings_below 3 floors with Area >= 5000 m² at 01: Special Utilization

Anhang 7.C Karten

Dieser Anhang beinhaltet alle detaillierten Kartendarstellungen aus dem Kapitel 7. Ebenfalls sind die Klassifizierungsergebnisse beider Untersuchungsgebiete angehängt.



Übersichtskarte Untersuchungsgebiet I - Berlin-Ost

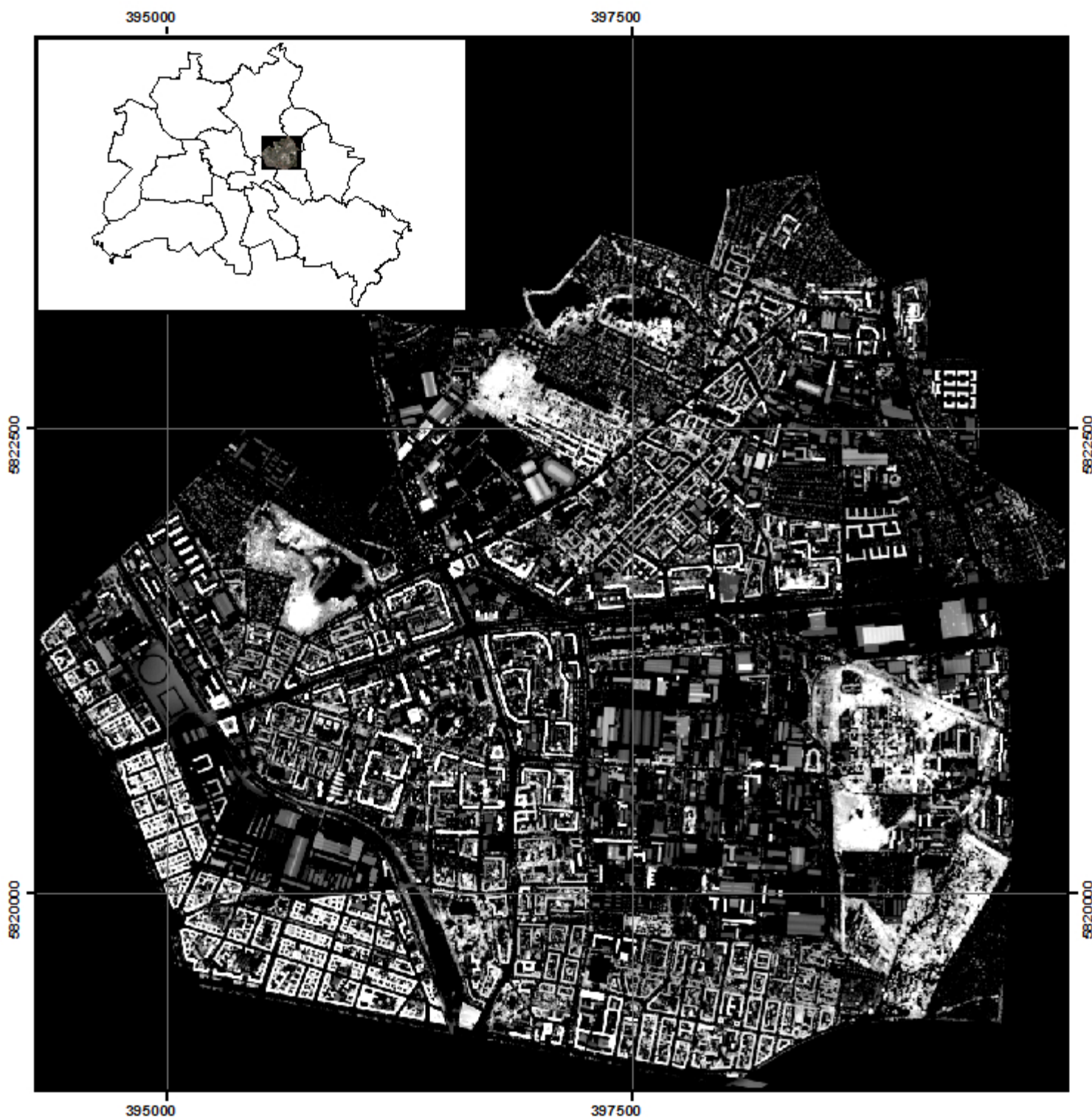
True Ortho Mosaik
RGB-Darstellung

 **Bezirksgrenzen**

0 0,25 0,5 1 1,5 2 km




Quelle:	DLR - OS
Befliegung:	UltraCam X
Befliegungszeitraum:	September 2010
Projektion:	UTM 33N
Geodätisches Datum:	ETRS89
Layout:	Arnold
Datum:	15.09.2015



Übersichtskarte Untersuchungsgebiet I - Berlin-Ost

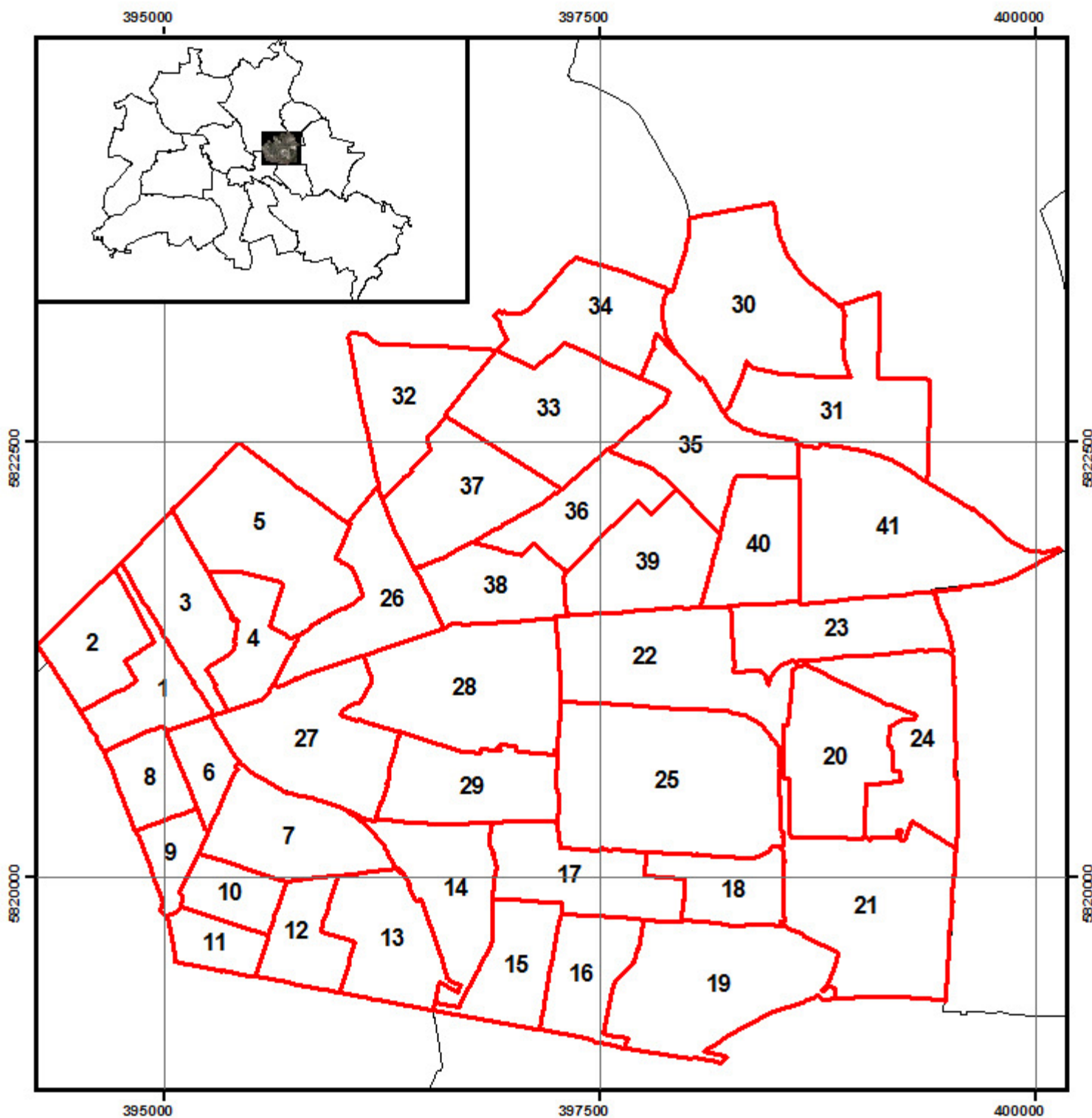
True Ortho Mosaik
nDOM-Darstellung

 **Bezirksgrenzen**

0 0,25 0,5 1 1,5 2 km



Quelle:	DLR - OS
Befliegung:	UltraCam X
Befliegungszeitraum:	September 2010
Projektion:	UTM 33N
Geodätisches Datum:	ETRS89
Layout:	Arnold
Datum:	15.09.2015

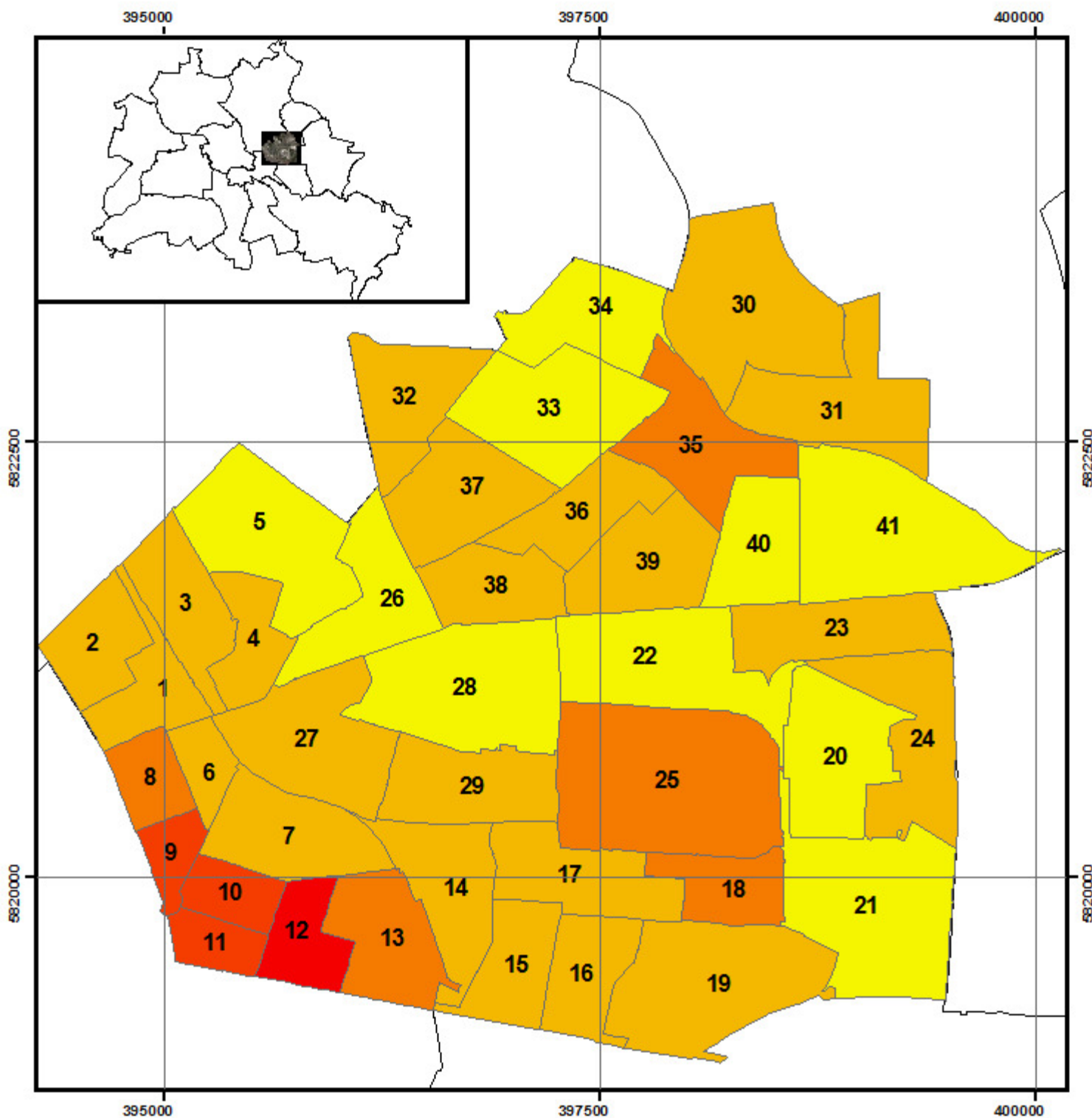


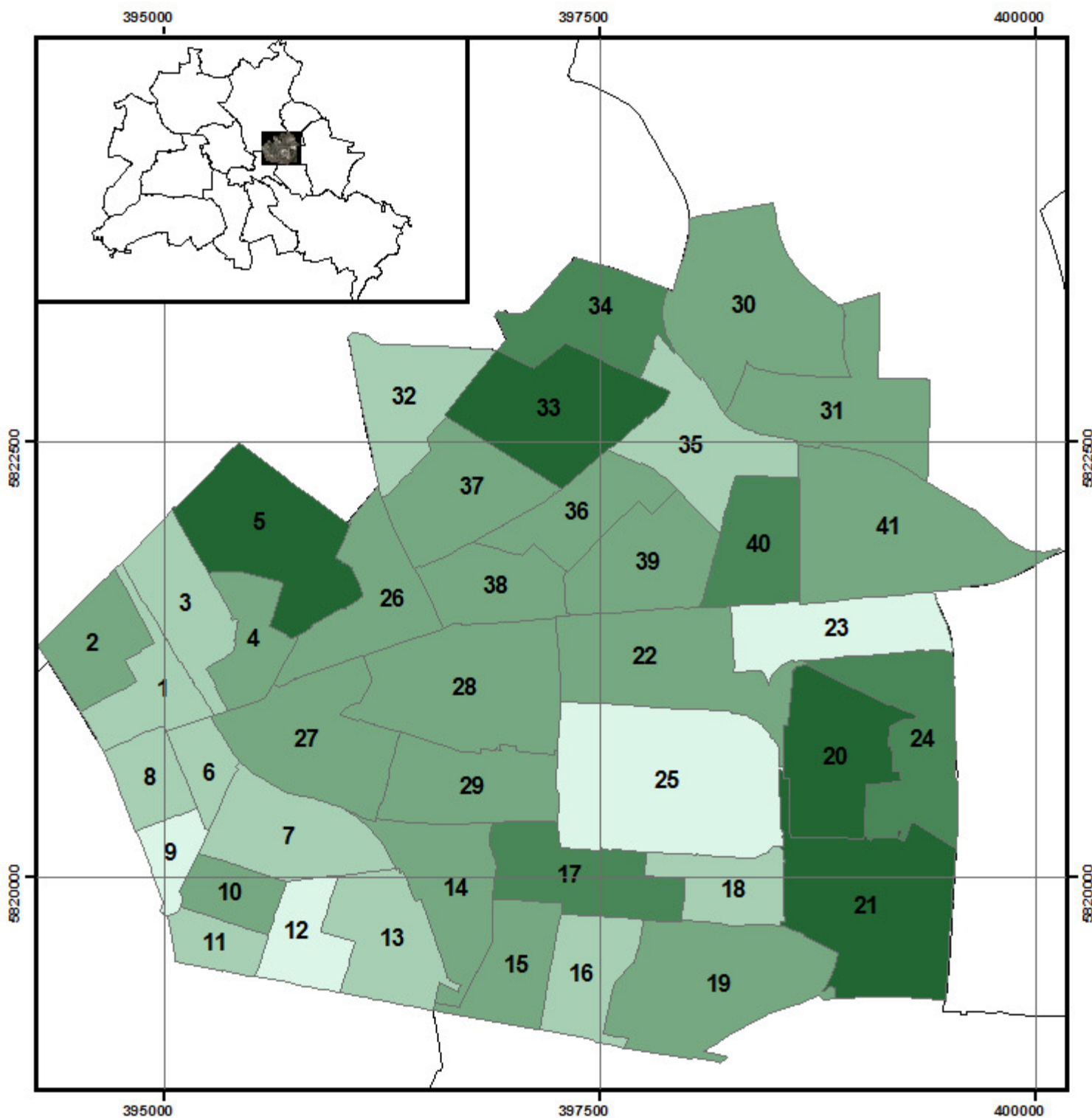
Übersichtskarte der TVz im Untersuchungsgebiet I - Berlin-Ost

-  TVz - Zonen
-  Bezirksgrenzen

0 0,25 0,5 1 1,5 2 km

Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015

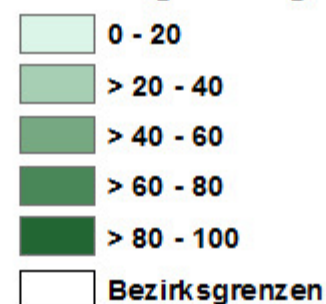




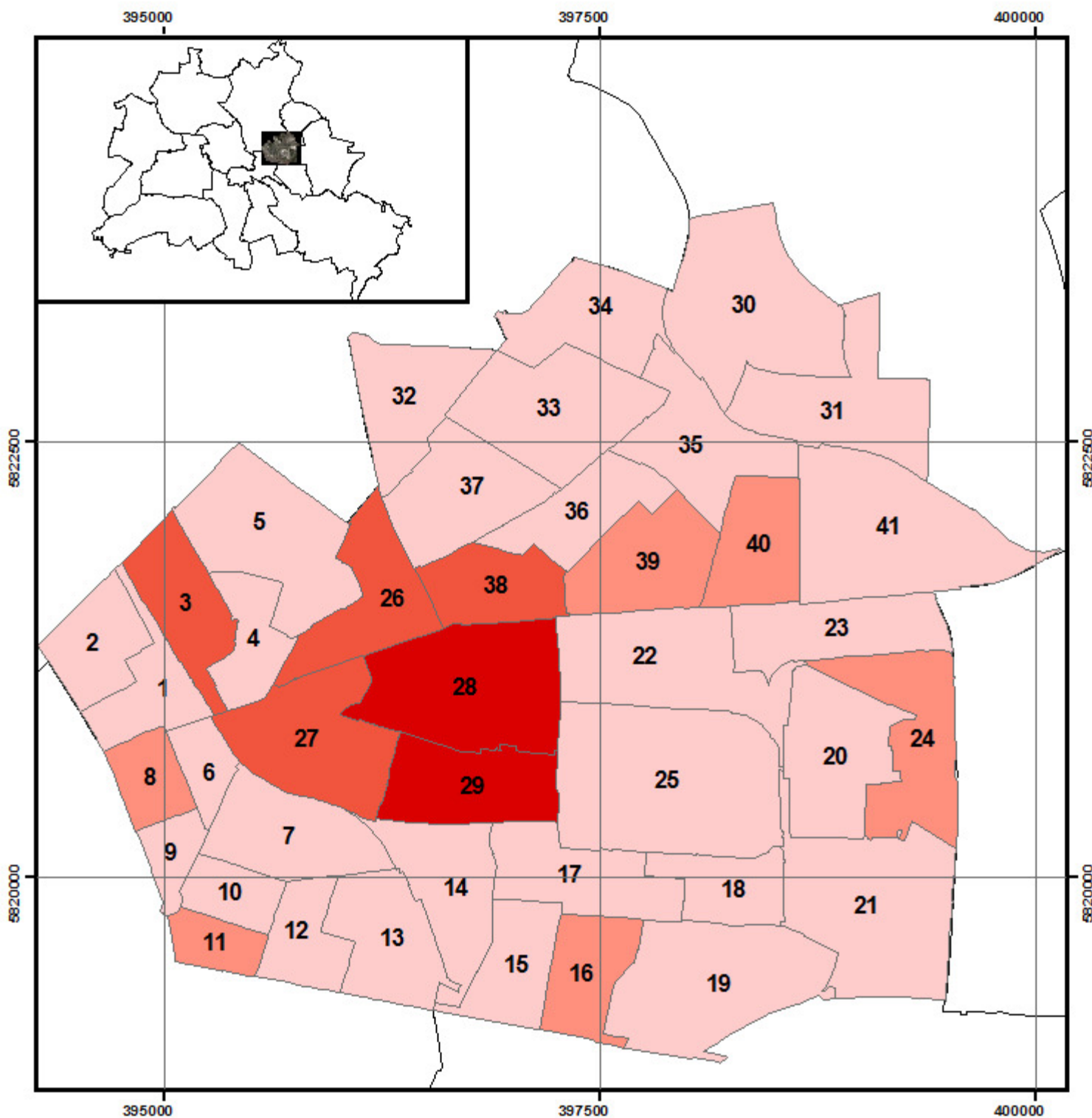
Prozentualer Vegetationsanteil im Untersuchungsgebiet I jeTVz-Zone

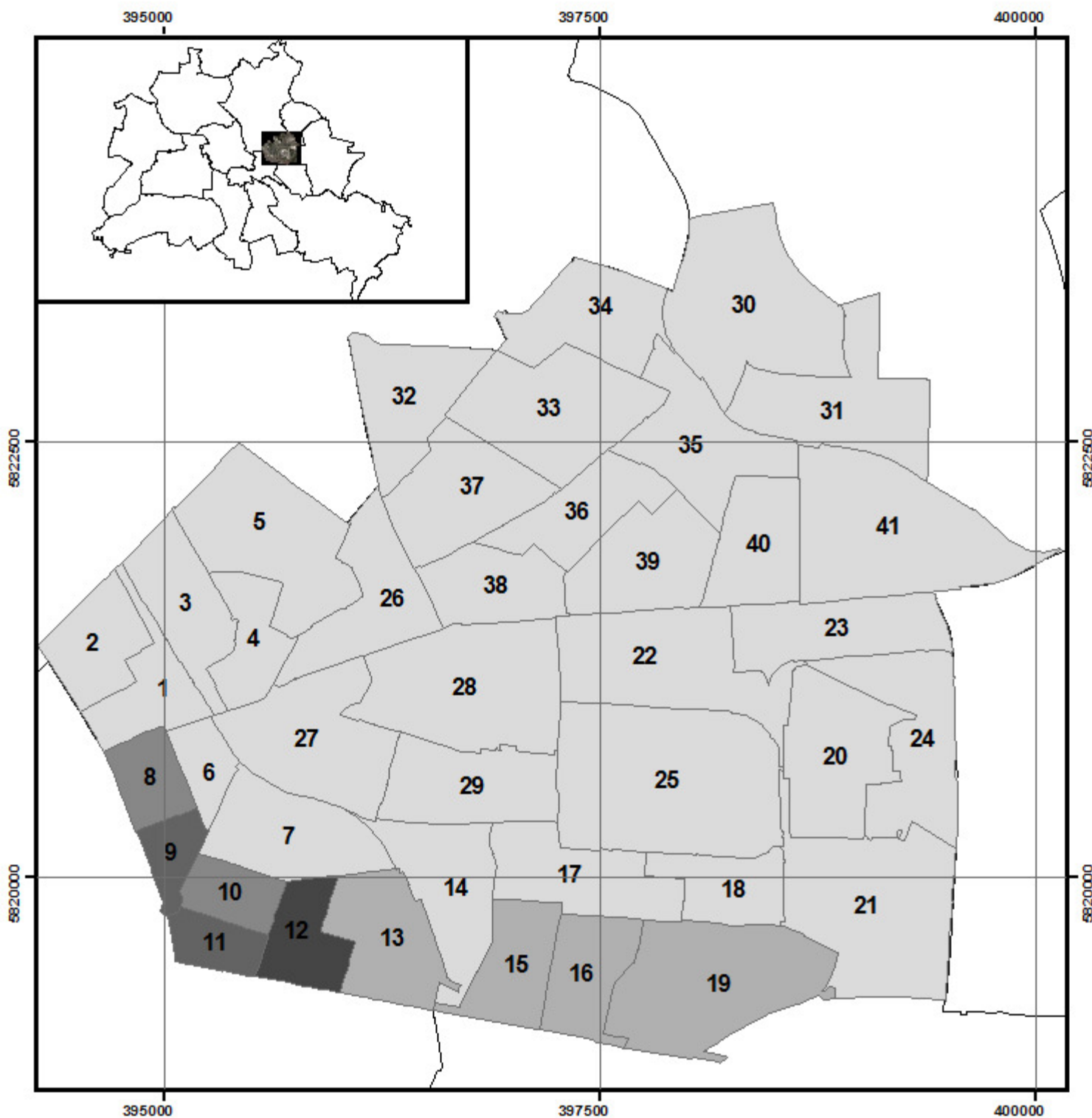
TVz - Zonen

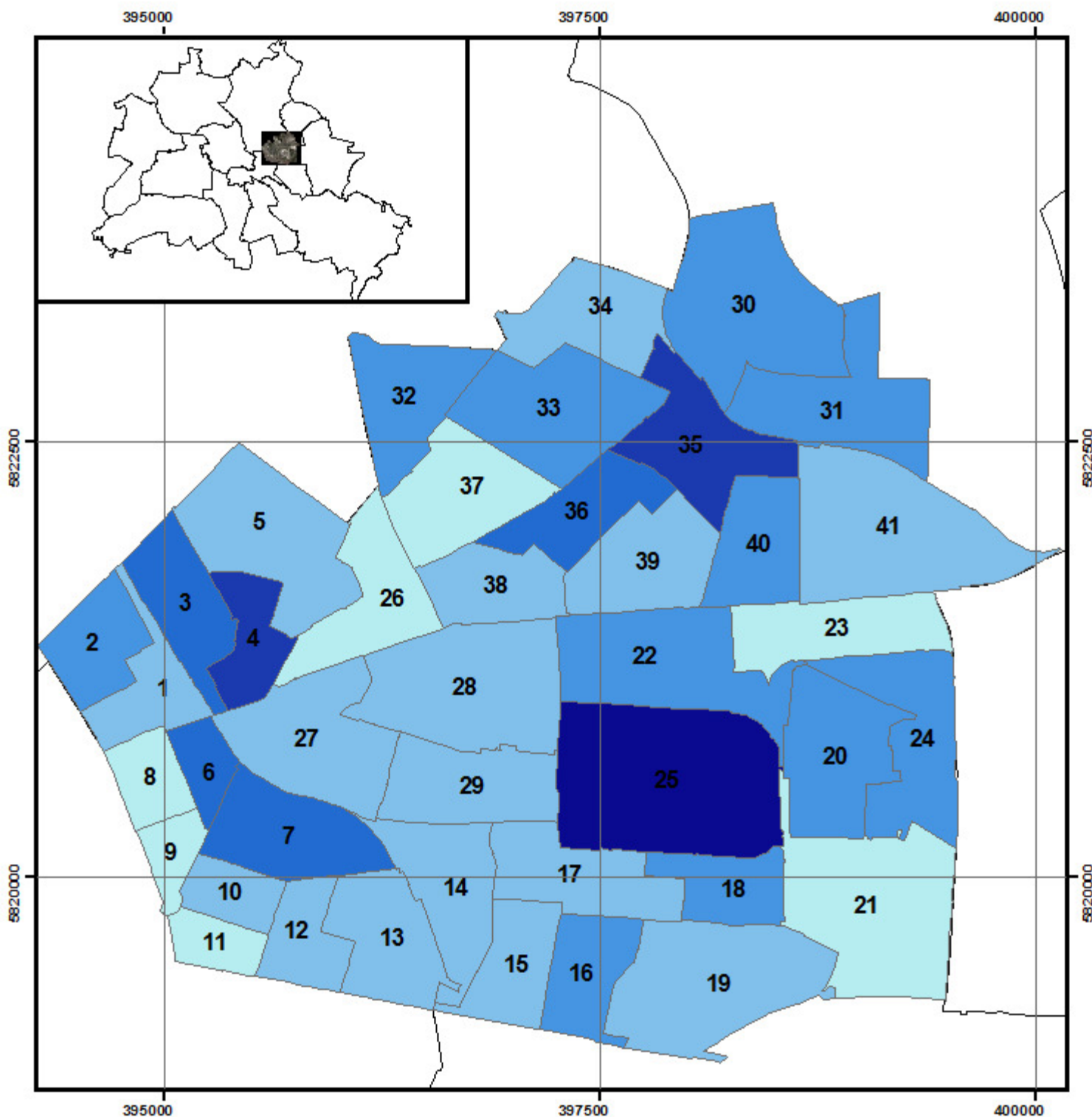
Anteil Vegetation gesamt in %



Projektion: UTM 33N
 Geodätisches Datum: ETRS89
 Layout: Arnold
 Datum: 15.09.2015







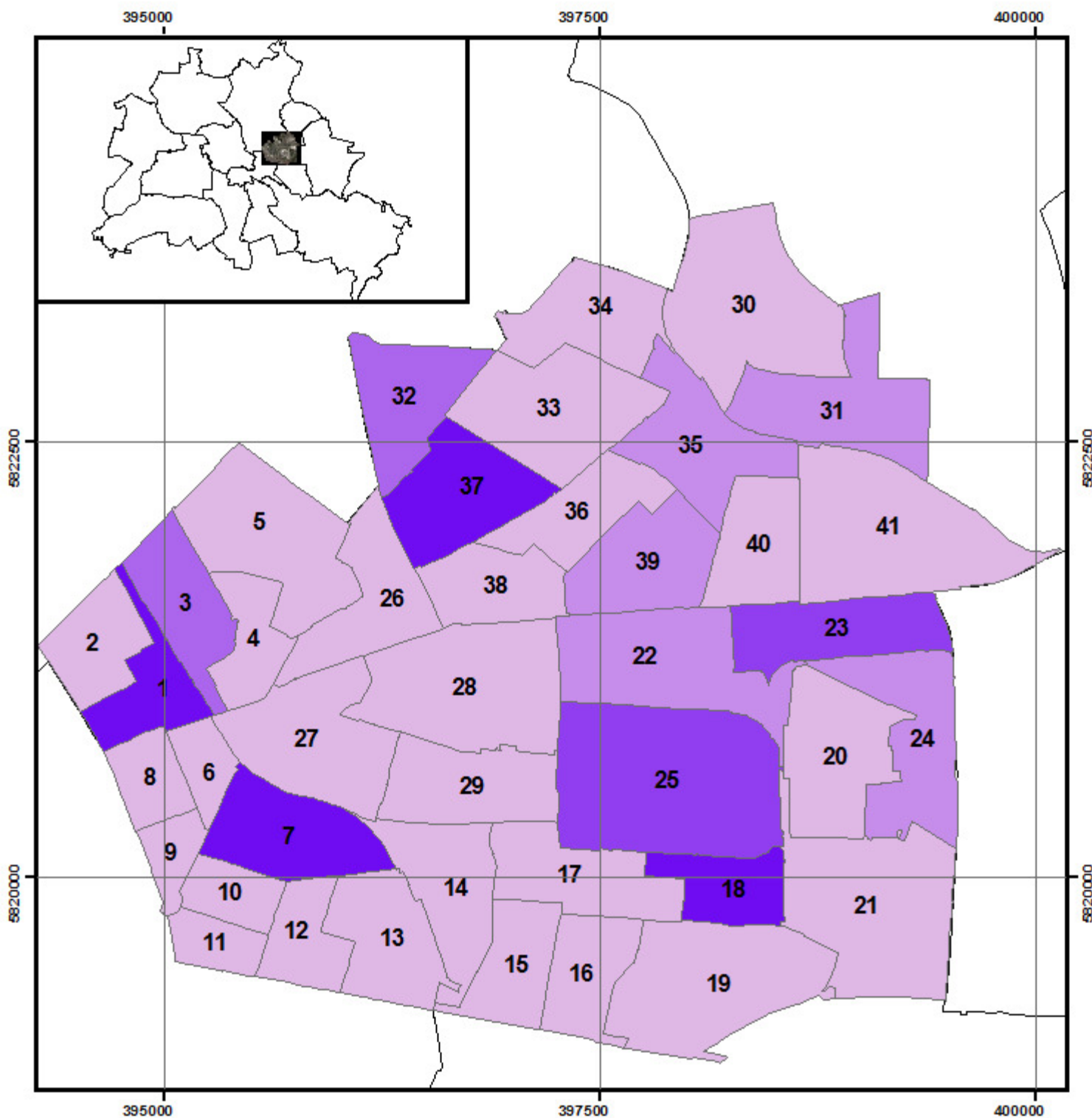
Prozentualer Anteil von Gebäuden geringer Höhe im Untersuchungsgebiet I jeTVz-Zone

TVz - Zonen

Anteil Gebäude geringer Höhe in %



Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015



Prozentualer Anteil von Gebäuden mit speziellem Nutzen im Untersuchungsgebiet I jeTVz-Zone

TVz - Zonen

Gebäude mit spezieller Nutzung in %



Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015

58 17 500

58 15 000

385000

387500



385000


387500

58 17 500

58 15 000

Übersichtskarte Untersuchungsgebiet II - Berlin-West

True Ortho Mosaik
RGB-Darstellung

 Bezirksgrenzen

0 0,25 0,5 1 1,5 2 km



Quelle:	DLR - OS
Befliegung:	UltraCam X
Befliegungszeitraum:	September 2010
Projektion:	UTM 33N
Geodätisches Datum:	ETRS89
Layout:	Arnold
Datum:	15.09.2015

58 17 500

58 15 000

385000

387500



385000


387500

58 17 500

58 15 000

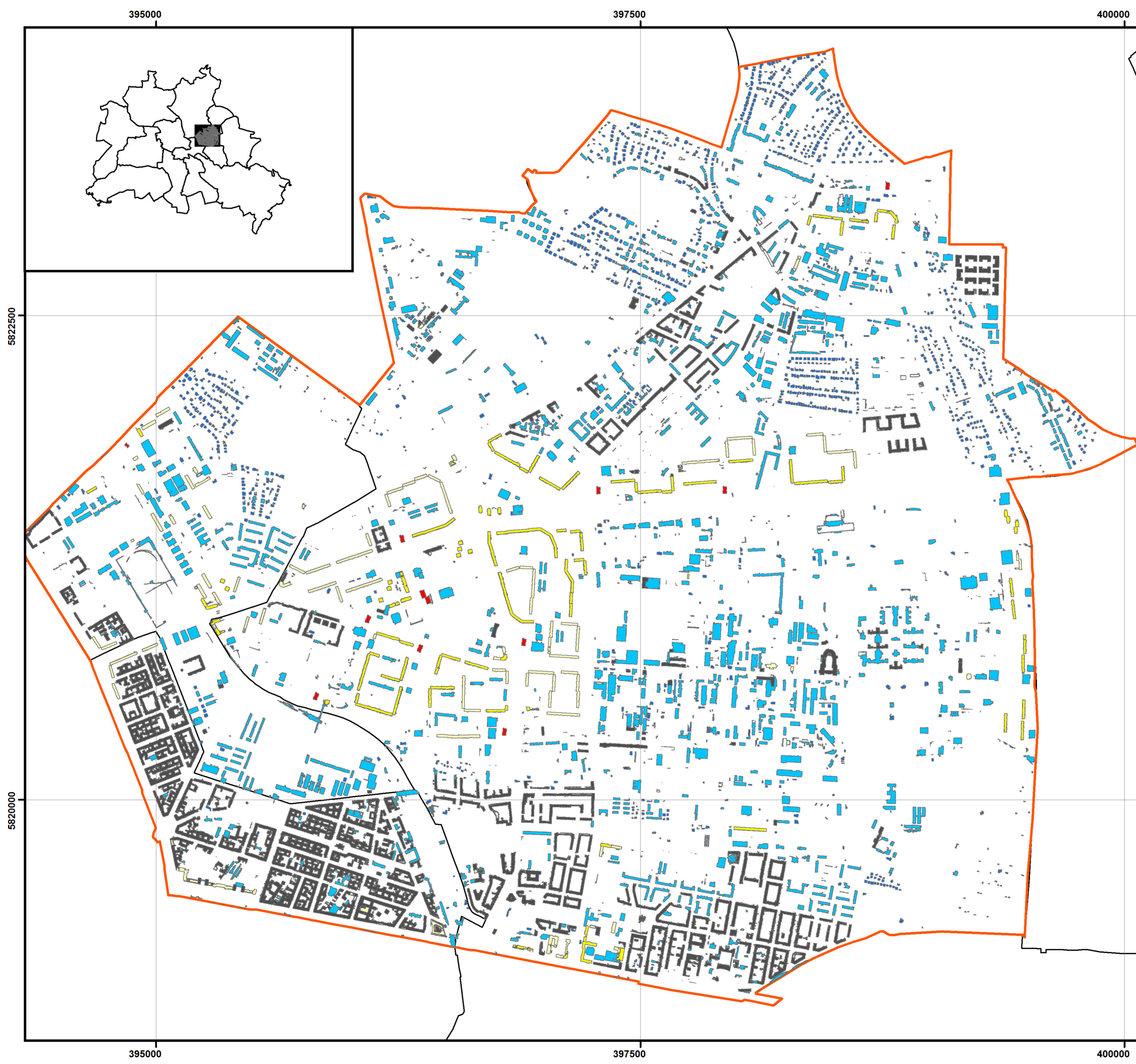
Übersichtskarte Untersuchungsgebiet II - Berlin-West

True Ortho Mosaik
nDOM-Darstellung

 Bezirksgrenzen

0 0,25 0,5 1 1,5 2 km

Quelle:	DLR - OS
Befliegung:	UltraCam X
Befliegungszeitraum:	September 2010
Projektion:	UTM 33N
Geodätisches Datum:	ETRS89
Layout:	Arnold
Datum:	15.09.2015



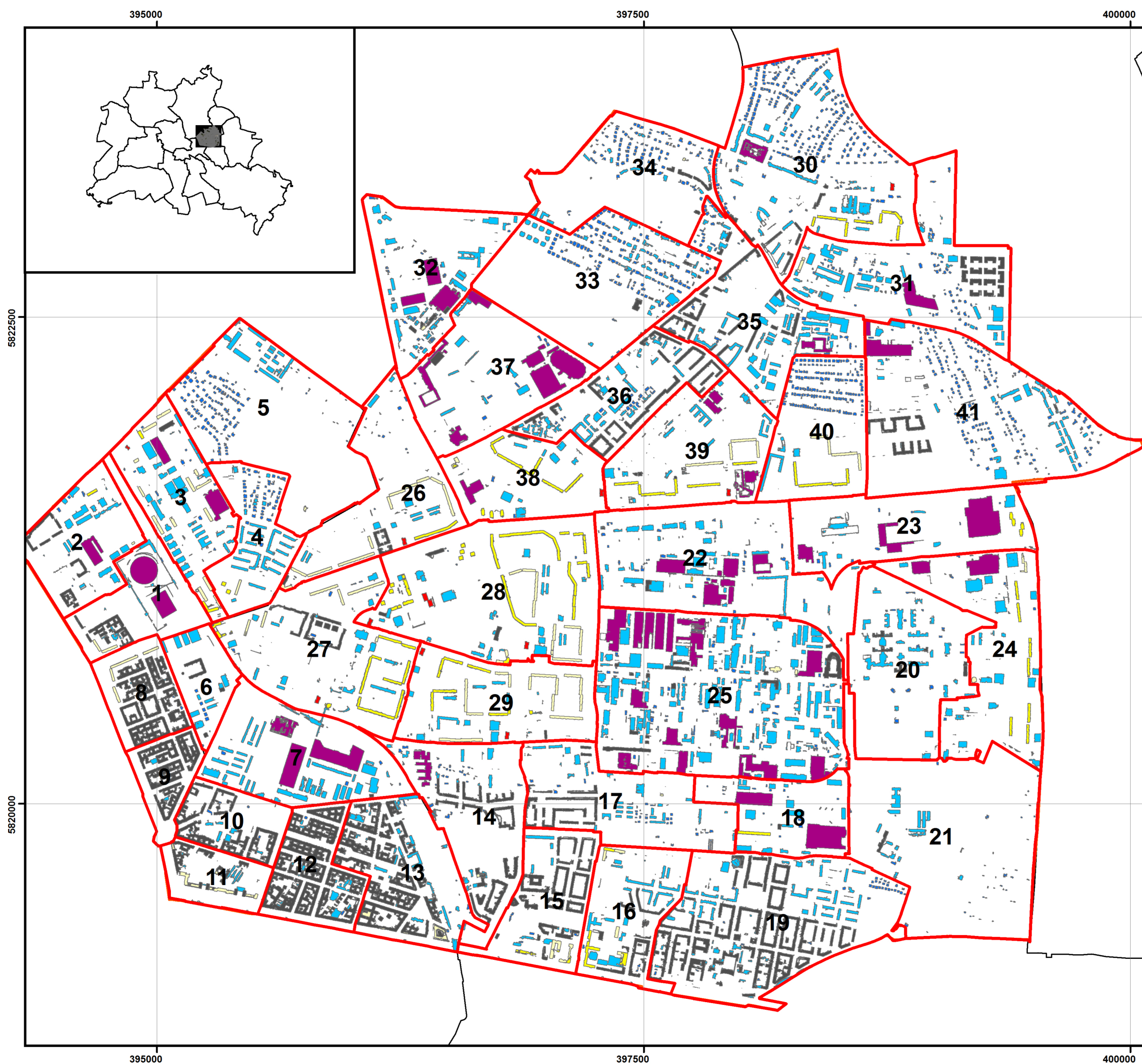
Ergebnis der Gebäudeklassifikation im Untersuchungsgebiet I

Berlin-Ost

- Hochhaus ab 21 Etagen
- Hochhaus zw. 17 bis 20 Etagen
- Hochhaus zw. 11 bis 16 Etagen
- Hochhaus zw. 8 bis 10 Etagen
- Flachdachgebäude zw. 3 bis 7 Etagen
- Spitzdachgebäude zw. 3 bis 5 Etagen
- Gebäude unter 3 Etagen
- Einfamilienwohnhaus
- Gebäude mit spezieller Nutzung
- Balkone
- Bezirksgrenzen
- TVz - Zonen

0 0,25 0,5 1 km

Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015

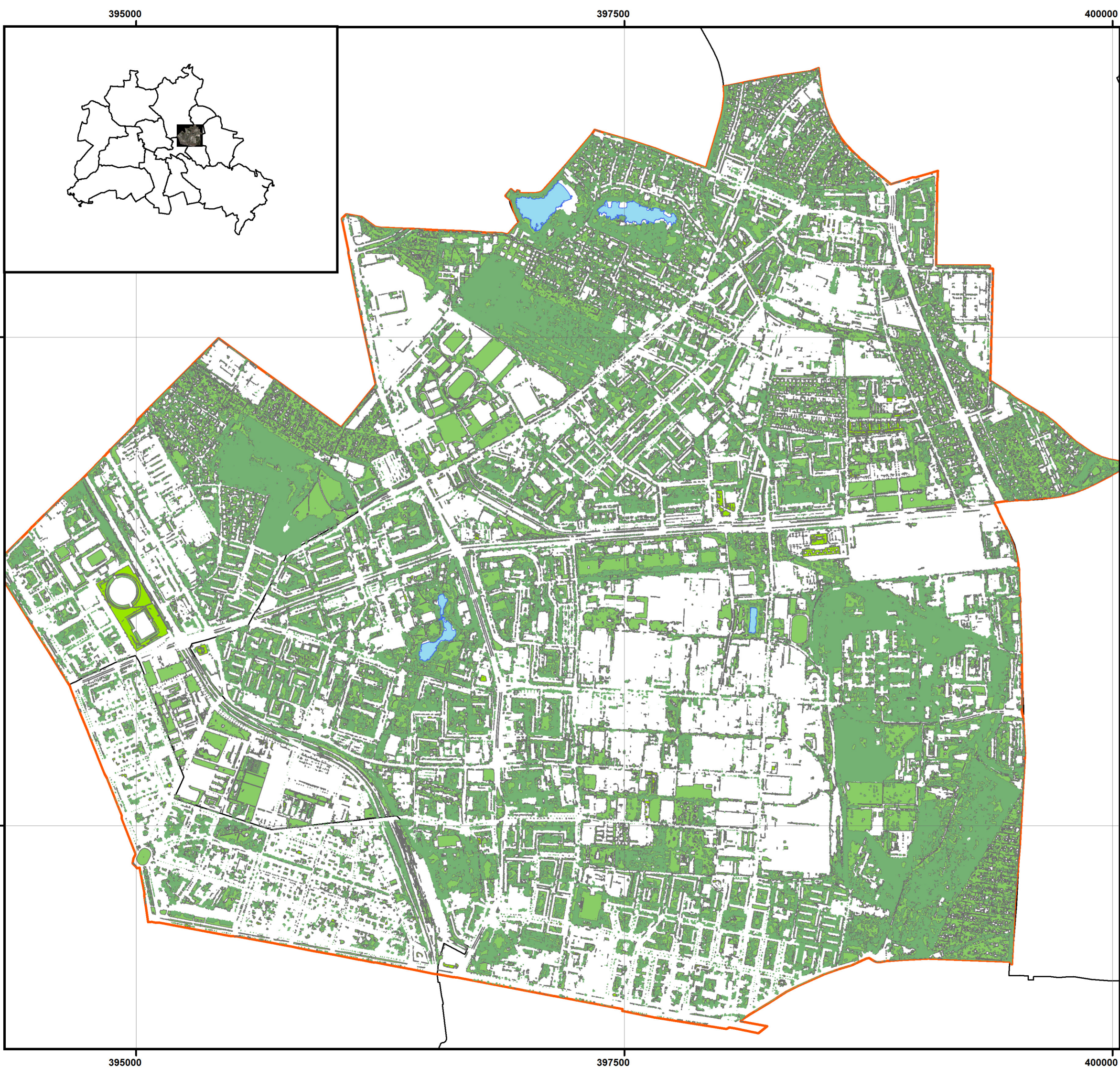


Ergebnis der Gebäudeklassifikation im Untersuchungsgebiet I - Berlin-Ost

- Hochhaus ab 21 Etagen
- Hochhaus zw. 17 bis 20 Etagen
- Hochhaus zw. 11 bis 16 Etagen
- Hochhaus zw. 8 bis 10 Etagen
- Flachdachgebäude zw. 3 bis 7 Etagen
- Spitzdachgebäude zw. 3 bis 5 Etagen
- Gebäude unter 3 Etagen
- Einfamilienwohnhaus
- Gebäude mit spezieller Nutzung
- Balkone
- Bezirksgrenzen
- TVz - Zonen

0 0,25 0,5 1 km

Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015

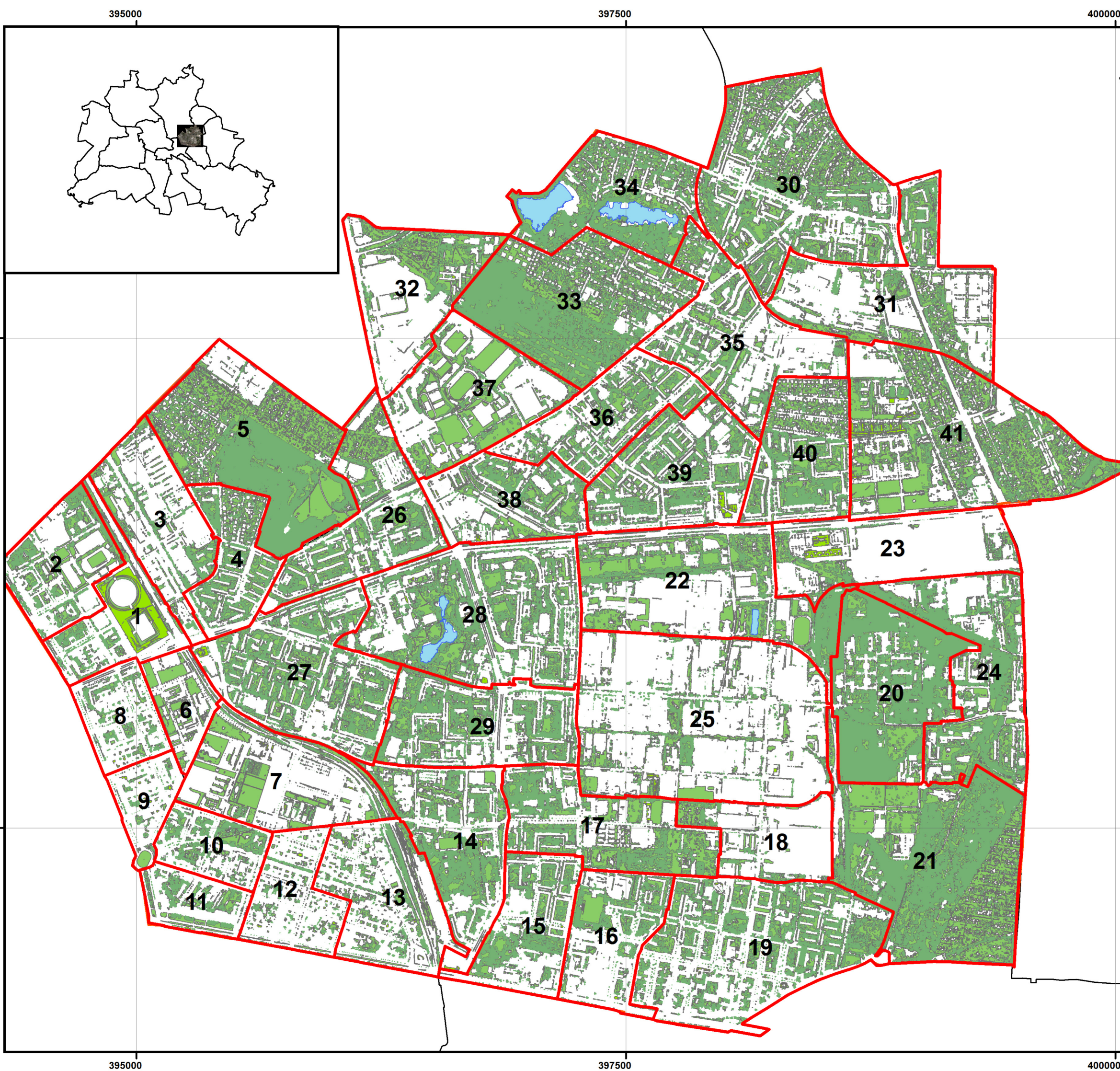


Ergebnis der
Umfeldklassifikation im
Untersuchungsgebiet I
-
Berlin-Ost

-  Wasser
-  erhöhte Vegetation
-  bodennahe Vegetation
-  Dachbegrünung
-  Bezirksgrenzen
-  TVz - Zonen

0 0,25 0,5 1 km

Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015



Ergebnis der
Umfeldklassifikation im
Untersuchungsgebiet I
-
Berlin-Ost

- Wasser
- erhöhte Vegetation
- bodennahe Vegetation
- Dachbegrünung
- Bezirksgrenzen
- TVz - Zonen

0 0,25 0,5 1 km

Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015

385000

387500

5817500

5817500

5815000

5815000

385000

387500

Ergebnis der
Gebäudeklassifikation im
Untersuchungsgebiet II
-
Berlin-West

- Hochhaus ab 21 Etagen
- Hochhaus zw. 17 bis 20 Etagen
- Hochhaus zw. 11 bis 16 Etagen
- Hochhaus zw. 8 bis 10 Etagen
- Flachdachgebäude zw. 3 bis 7 Etagen
- Spitzdachgebäude zw. 3 bis 5 Etagen
- Gebäude unter 3 Etagen
- Einfamilienwohnhaus
- Gebäude mit spezieller Nutzung
- Balkone

Bezirksgrenzen

0 0,25 0,5 1 km

Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015



385000

387500

5817500

5817500

5815000

5815000

385000

387500

Ergebnis der
Gebäudeklassifikation im
Untersuchungsgebiet II
-
Berlin-West

- Hochhaus ab 21 Etagen
- Hochhaus zw. 17 bis 20 Etagen
- Hochhaus zw. 11 bis 16 Etagen
- Hochhaus zw. 8 bis 10 Etagen
- Flachdachgebäude zw. 3 bis 7 Etagen
- Spitzdachgebäude zw. 3 bis 5 Etagen
- Gebäude unter 3 Etagen
- Einfamilienwohnhaus
- Gebäude mit spezieller Nutzung
- Balkone
- TVz - Zone
- Bezirksgrenzen

0 0,25 0,5 1 km

Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015



385000

387500

5817500

5817500






5815000

5815000

385000

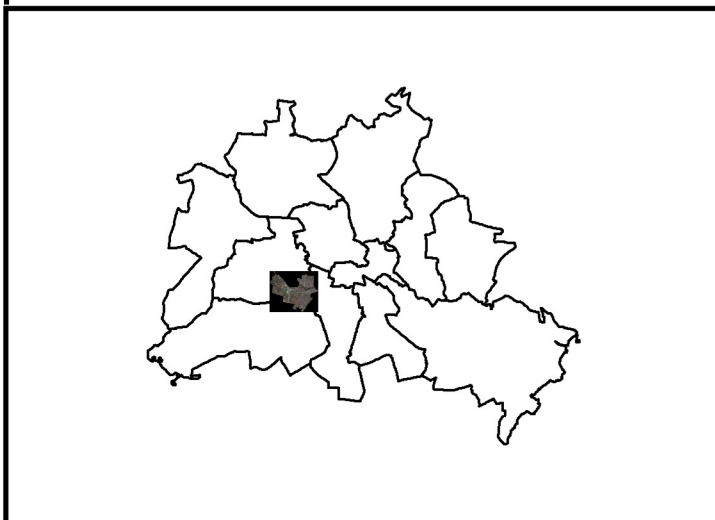
387500

Ergebnis der
Umfeldklassifikation im
Untersuchungsgebiet II
-
Berlin-West

-  Wasser
-  erhöhte Vegetation
-  bodennahe Vegetation
-  Dachbegrünung
-  Bezirksgrenzen

0 0,25 0,5 1 km

Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015



385000

387500

5817500

5817500







5815000

5815000

385000

387500

Ergebnis der
Umfeldklassifikation im
Untersuchungsgebiet II
-
Berlin-West

-  Wasser
-  erhöhte Vegetation
-  bodennahe Vegetation
-  Dachbegrünung
-  TVz - Zone
-  Bezirksgrenzen

0 0,25 0,5 1 km

Projektion: UTM 33N
Geodätisches Datum: ETRS89
Layout: Arnold
Datum: 15.09.2015

